



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**INTEGRACE NANOSTRUKTUR DO FUNKČNÍCH
CELKŮ**

INTEGRATION OF NANOSTRUCTURES INTO FUNCTIONAL DEVICES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Citterberg

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Bc. Daniel Citterberg**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Integrace nanostruktur do funkčních celků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nanostrukturované materiály slibují díky svým fyzikálním vlastnostem nové aplikace v elektronice a fotonice. Avšak vytváření funkčních součástek je z mnoha důvodů obtížné – základní stavební bloky (např. nanodráty) je třeba uspořádat na podložce, vytvořit k nim elektrické kontakty atd. Student se zaměří na tyto jednotlivé kroky s cílem dosáhnout opakovatelné výroby jednoduchých zařízení umožňujících např. elektrická měření nanodrátů.

Cíle diplomové práce:

1. Navrhněte postup pro kontaktování jednorozměrných materiálů (nanodráty, nanotrubic), příp. 2D materiálů.
2. Na připraveném systému proveďte elektrická, příp. optická měření nebo elektrochemická měření.

Seznam doporučené literatury:

RAI-CHOUDHURY, P. Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication. London, UK: Institution of Electrical Engineers, 1997. IEE materials & devices series, 12A-12B. ISBN 0819423793.

LEVI, R., BITTON, O., LEITUS, G., TENNE, R., JOSELEVICH, E. Field-Effect Transistors Based on WS₂ Nanotubes with High Current-Carrying Capacity. Nano Letters. 2013, 13(8), 3736-3741.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto diplomová práca je zameraná na charakterizáciu elektrických transportných vlastností polovodičových jednorozmerných nanoštruktúr. Prvá časť práce sa venuje teoretickému popisu možností určenia charakteristických veličín, ako je odpor, merný odpor, vodivosť a koncentrácia nosičov náboja. Taktiež je podaný bližší pohľad na problematiku vytvárania kontaktov pomocou elektrónovej litografie. V práci je tiež popísaný prístup charakterizácie s využitím meraní fotoluminiscencie. Druhá časť popisuje praktickú realizáciu meraní elektrických transportných vlastností. Sú uvedené výsledky elektrických transportných meraní a fotoluminiscencie WS_2 nanotrubíc, InAs a $\text{WO}_{2.72}$ nanodrôtov. Posledná časť sa venuje radiálnym heteroštruktúram, v pohode kvantových jám. Táto časť podáva bližší pohľad na problematiku a taktiež uvádza výsledky merania fotoluminiscencie, ako nástroja na určenie kvality vytvorených heteroštruktúr.

Kľúčové slová

Jednorozmerné nanoštruktúry, elektrónová litografia, elektrické transportné vlastnosti, fotoluminiscencia, heteroštruktúry, kvantová jama.

Abstract

This master thesis is focused on characterization of electrical transport properties of one-dimensional nanostructures. First section of this work deals with theoretical description of the experimental approaches to realization of such measurements. This section involves also a detail discussion of preparation of contacts using e-beam lithography. Next, theoretical description of characterization of nanostructures using photoluminescence measurements is given. Second section describes practical application of the aforementioned electrical transport measurements. Presented results include transport and photoluminescence measurements of WS_2 nanotubes, InAs and $\text{WO}_{2.72}$ nanowires. The last section of this thesis deals with nanowire quantum well heterostructures. The section provides both a deeper theoretical view of the problem and results of the photoluminescence measurements are shown.

Keywords

one-dimensional nanostructures, e-beam lithography, electrical transport measurements, photoluminescence, nanowire quantum well heterostructures

CITTERBERG, Daniel. *Integrace nanostruktur do funkčních celků* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117554>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Kolíbal.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Integrace nanostruktur do funkčních celků“ som vypracoval samostatne pod odborným vedením vedúceho práce doc. Ing. Miroslava Kolíbalu, Ph.D. s použitím odbornej literatúry a ďalších zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname použitej literatúry na konci práce.

Brno

.....
(podpis autora)

Pod'akovanie

Ďakujem doc. Ing. Miroslavovi Kolíbalovi, Ph.D. za odborné vedenie, pomoc a podporu pri písaní a realizácii tejto diplomovej práce. Ďalej ďakujem kolegom za pomoc pri realizácii experimentov potrebných pre vypracovanie tejto práce, špeciálne ďakujem Bc. Kristýne Bukvišovej za poskytnutie snímok z transmisného elektrónového mikroskopu uvedených v tejto práci. Ďakujem členom výskumnej skupiny ao. Univ.-Prof. Dr. Aloisa Lugsteina z Inštitútu Elektroniky Pevných Látok Technickej Univerzity vo Viedni za cenné rady a pomoc pri meraniach elektrických transportných vlastností jednorozmerných nanoštruktúr, ďakujem členom výskumnej skupiny Univ.-Prof. Dr. Gottfrieda Strassera z Inštitútu Elektroniky Pevných Látok Technickej Univerzity vo Viedni za pomoc a podporu pri výmennom študijnom pobyte ERASMUS+, špeciálne M.Phys Suzanne Lancaster za jej vedenie, pomoc a podporu počas študijného pobytu. V neposlednom rade ďakujem zamestnancom a kolektívu Stredoeurópskeho Technologického Inštitútu za vytvorenie príjemného pracovného prostredia, a za ich pomoc pri experimentoch umožňujúcich vytvorenie tejto práce. Nakoniec by som rád poďakoval mojej rodine a priateľom za ich podporu počas celého štúdia.

Táto práca bola realizovaná za podpory výskumnej infraštruktúry CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016 – 2019), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

Daniel Citterberg

Obsah

Úvod.....	1
1. Postupy merania elektrických vlastností	3
1.1 Elektrické transportné merania	3
1.1.1 Dvojbodová a štvorbodová metóda	3
1.1.2 Metóda využívajúca Hallov jav.....	8
1.1.3 Pulzné merania	10
1.2 Kontaktovanie	13
1.3 Špecifikácie kontaktovania	17
1.4 Fotoluminiscencia	22
2 Realizácia meraní.....	24
2.1 Elektrické transportné vlastnosti.....	24
2.2 Fotoluminiscenčné merania	37
3. Funkčné celky	40
Záver	45
Literatúra.....	47

Úvod

Dominujúcim trendom väčšiny moderných elektronických zariadení, je snaha o ich neustále znižovanie a zvyšovanie ich výkonu. Obmedzenie rozmerov materiálu v jednej, dvoch, alebo všetkých troch dimenziách vedie k vlastnostiam, ktoré nie sú pozorované (popríklad vôbec pozorovateľné) v prípade rovnakého, avšak rozmerovo neobmedzeného materiálu. Čím viac sú rozmery materiálov obmedzené, tým viac sa môže prejaviť zmena vlastností materiálu. Štruktúra s obmedzením rozmerov v jednej dimenzii teoreticky limitne až na nulovú hodnotu sa označuje pojmom dvojrozmerná štruktúra. Jednorozmerná štruktúra je potom rozmerovo obmedzená v dvoch dimenziách a nularozmerná štruktúra je rozmerovo obmedzená vo všetkých troch dimenziách. Experimentálne však obmedzenie rozmerov materiálu nie je možné až na nulové rozmery. Avšak aj u kvazidvojrozmerných, kvazijednorozmerných a kvazinularozmerných štruktúr je možné pozorovať javy^[1], ktoré nie sú pozorované u objemových materiálov (rozmerovo neobmedzených). Určiť všeobecnú hranicu, kedy je možné štruktúru považovať za kvazidvojrozmernú, kvazijednorozmernú popríklad kvazinularozmernú je zložitá. Zväčša sa tak deje pri štruktúrach s obmedzenými rozmermi v rádoch desiatok (niekedy až stoviek) nanometrov. Táto práca sa venuje predovšetkým kvazijednorozmerným štruktúram a v tejto práci sú označované ako jednorozmerné nanoštruktúry (vyjadrujú obmedzenie ich rozmerov v dvoch dimenziách rádovo na desiatky až stovky nanometrov).

Jednorozmerné nanoštruktúry sú pojmom súhrnne označujúcim viaceré druhy nanoštruktúr. Dvomi hlavnými druhmi, ktorými sa táto práca zaoberá sú nanodrôty a nanotrubice. Rozdiel, ako už naznačujú názvy, je v tom, či má daná jednorozmerná nanoštruktúra vnútro vyplnené materiálom – nanodrôt alebo je tvorená vrstvami a vnútro materiálom vyplnené nie je. Jednorozmerné nanoštruktúry nachádzajú svoje uplatnenie v rôznych odvetviach. Využívajú sa v mnohých elektronických zariadeniach, v poľom ovládaných tranzistoroch procesorov počítačov^{[2][3][4]}, v solárnych článkoch^{[5][6]}, používajú sa ako senzory, či už na detekciu svetla^{[7][8][9]} alebo rôznych chemických (biologických)^{[10][11]} látok. Jednorozmerné nanoštruktúry môžu byť využité nie len ako detektory, ale aj ako emitory svetla^{[12][13]}. Taktiež umožňujú premenu elektrického signálu na svetelný, čím sa následne môže zvýšiť rýchlosť prenosu informácií v integrovaných obvodoch^[14].

Väčšina týchto aplikácií je možná vďaka jednorozmerným nanoštruktúram tvoreným polovodičovými materiálmi. Polovodiče sú materiály, v ktorých pásovej štruktúre je vodivostný a valenčný pás oddelený pásom zakázaných energií^[15]. Ten určuje vlastnosti daného materiálu, predovšetkým koncentráciu nosičov náboja. Polovodiče sú veľmi využívané hlavne pre schopnosť meniť ich elektrické vlastnosti, v mnohých prípadoch spôsobom, ktorý priamo vyžaduje daná aplikácia. Vlastnosti polovodičov je možné ovplyvňovať ich dotovaním. To je možné docieľiť nahradením istého počtu atómov pôvodného materiálu vhodnými atómami iného materiálu. Vlastnosti takto vytvoreného materiálu závisia na koncentrácii nových atómov v pôvodnom polovodičovom materiáli. Vhodnými kandidátmi sú materiály s atómami obsahujúcimi buď viac valenčných elektrónov (n-dotovaný polovodič) alebo naopak menej valenčných elektrónov (p-dotovaný polovodič) než atómy pôvodného polovodičového materiálu. Toto je základný pohľad na problematiku. Niektoré zložitejšie aspekty budú diskutované v texte práce. Dotovanie môžeme rozdeliť do dvoch skupín: zámerné a nezámerné. K nezámernému dotovaniu zväčša dochádza už pri výrobe jednorozmerných nanoštruktúr, kedy do polovodičového materiálu prenikajú atómy z prostredia, a tým môžu spôsobiť dotovanie polovodičov^{[16][17]}. K nezámernému dotovaniu môže taktiež dôjsť až po spojení nanoštruktúr

s inými materiálmi. Zámerné dotovanie slúži práve na úpravu vlastností polovodičov vhodným spôsobom.

Pred integráciou vytvorených jednorozmerných nanoštruktúr do konkrétnych aplikácií a zložitejších funkčných celkov je najprv potrebné zistiť vlastnosti pripravených nanoštruktúr. Práve problematike určenia vlastností pripravených jednorozmerných nanoštruktúr sa venuje táto práca. Prvou metódou určenia sú merania elektrických transportných vlastností. Možným prístupom k meraniam sa venuje prvá sekcia práce. Ďalej sú vysvetlené problémy, ktoré je nutné prekonať pri meraniach a manipulácii s tak malými objektami ako sú jednorozmerné nanoštruktúry. Ďalej je prezentovaný druhý spôsob meraní – fotoluminiscenčné merania, ktoré sú menej náročné zo stránky ich praktickej realizácie. Druhá sekcia sa venuje praktickej realizácii meraní na konkrétnych jednorozmerných polovodičových nanoštruktúrach. Jedná sa o nanotrubice WS_2 vytvorené spoluprácou výskumných skupín Ally Zaka z Technologického Inštitútu v Holon a Reshefa Tenneho z Weizmannovho Inštitútu v Izraeli, nanodrôty InAs, nanodrôty $WO_{2,72}$ vytvorené výskumnou skupinou Ally Zaka a Ge nanodrôty. Uvedené nanoštruktúry majú rôzne praktické aplikácie. WS_2 nanotrubice majú veľké potenciálne využitie napríklad ako senzory^[18], alebo ako poľom ovládané tranzistory^[19]. Ge nanodrôty vykazujú vysokú dierovú vodivosť čo v kombinácii s materiálom s vysokou elektrónovou vodivosťou môže zlepšiť súčasné procesory počítačov^[20]. Záverečná sekcia sa venuje jednému typu integrácie jednorozmerných nanoštruktúr do funkčných celkov a charakterizácii vlastností týchto celkov.

1. Postupy merania elektrických vlastností

1.1 Elektrické transportné merania

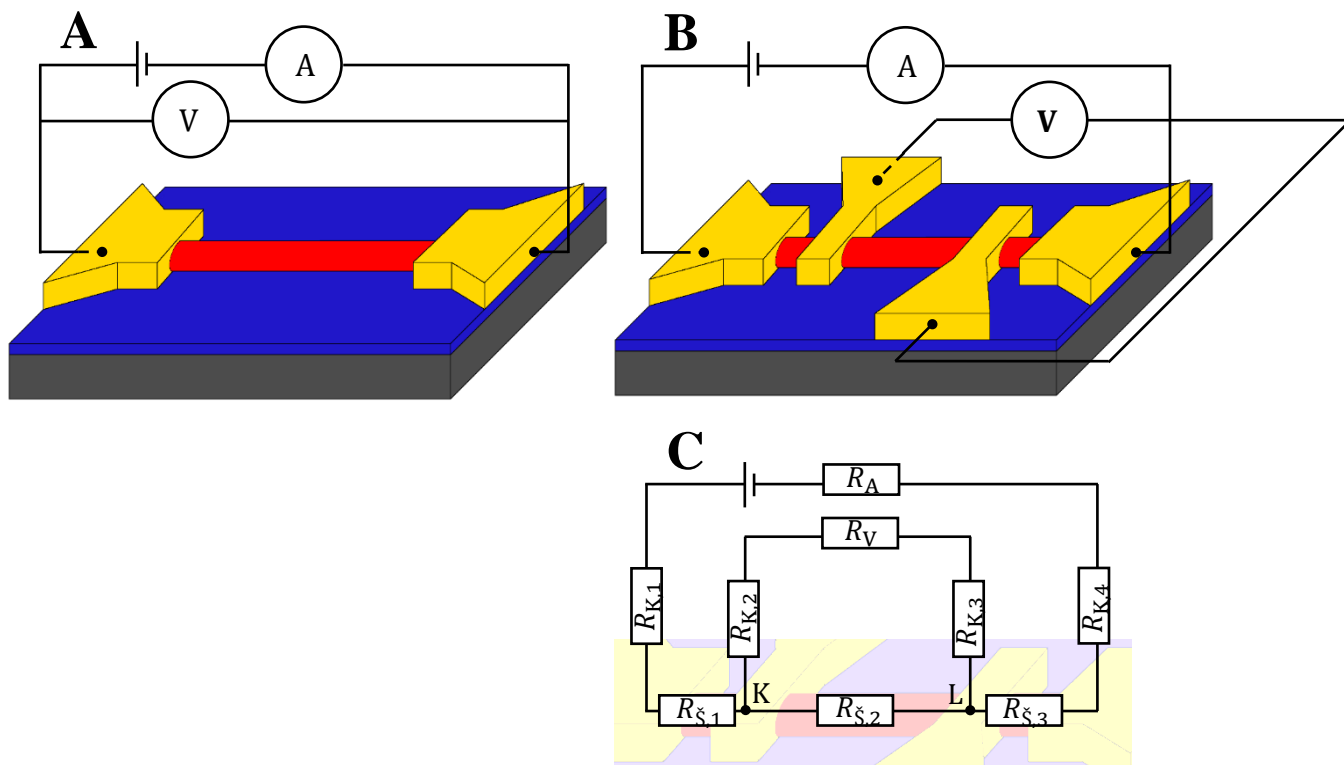
Pre využitie nanoštruktúr v komplexnejších systémoch je nutné najprv určiť vlastnosti týchto nanoštruktúr. Jednou zo základných vlastností je transport nosičov náboja cez nanoštruktúru. Popis transportu nosičov náboja vzorkou je možné určiť viacerými spôsobmi. Jedným zo základných prístupov je dvojbodová a štvorbodová metóda merania. Týmto spôsobom je možné určiť základné vlastnosti materiálu ako merný odpor a merná vodivosť. Pridaním hradlovej elektródy k týmto usporiadaniam je možné určiť vlastnosti ako pohyblivosť a koncentrácia nosičov náboja. Ďalšími metódami sú merania s využitím Hallovhov javu a pulzné merania.

1.1.1 Dvojbodová a štvorbodová metóda

Dvojbodová metóda merania elektrických vlastností látok je jedným zo základných prístupov. Experimentálne usporiadanie je zobrazené na obrázku č.1 A. Po pridaní hradlovej elektródy a dielektrickej vrstvy oddeľujúcej nakontaktovanú jednorozmernú nanoštruktúru a hradlovú elektródu sa jedná o merania v konfigurácii poľom ovládaného tranzistora. Ako je zrejmé z obrázka č.1 A, napätie sa v tomto prípade meria na prúdových kontaktoch čo do merania vnáša nepresnosti.

Nosiče náboja pri prechode materiálom strácajú svoju potenciálnu energiu, ktorá sa mení na Joulovo teplo^[21]. Preto napätie, ktoré meriame medzi prúdovými kontaktmi nezodpovedá napätiu na študovanej nanoštruktúre. Rozptýlenie energie závisí na materiáli, z ktorého je kontakt vytvorený. Riešením tohto problému je štvorbodová metóda merania. Experimentálne usporiadanie je zobrazené na obrázku č.1 B. K dvom prúdovým kontaktom sa pridávajú ďalšie dva napäťové kontakty. Cez kontakty umiestnené na koncoch nanoštruktúry sa privádza prúd a napätie sa meria medzi zvyšnými dvoma kontaktmi – priamo na nanoštruktúre. Menšou nevýhodou je to, že zmenšíme oblasť nanoštruktúry, na ktorej sa bude vykonávať meranie. Výhodou ale je presnejšie určenie napätia v tejto oblasti. Obrázok č.2 C schematicky zobrazuje vzorku s vyznačením odporov v jednotlivých častiach obvodu (časti obvodu sú myšlienkovito nahradené rezistormi s odporom, ktorý má daná časť obvodu). Rezistory $R_{S,1,...,S,3}$ reprezentujú odpory na nanoštruktúre v jednotlivých oblastiach, rezistory $R_{K,1,...,K,3}$ vyjadrujú odpory jednotlivých kontaktov, rezistor R_A popisuje vnútorný odpor ampérmetra a rezistor R_V popisuje vnútorný odpor voltmetra. U sériovo zapojených rezistorov je pri splnení podmienky zákona zachovania náboja v celom obvode rovnaký prúd^[22]. To znamená, že nanoštruktúrou prechádza prúd, ktorý meriame na ampérmetri A (obrázok č.2 A). U paralelne zapojených rezistorov je v každej vetve rovnaké napätie^[22]. To znamená, že na voltmetri V zmeriame napätie, ktoré je na nanoštruktúre medzi uzlovými bodmi K a L. Vďaka vysokému vnútornému odporu voltmetra R_V vetvou, v ktorej je zapojený prechádza len minimálny prúd. Vysoký vnútorný odpor voltmetra zabezpečuje, že rozptýli energiu a vznik Joulovho tepla v tejto vetve obvodu je minimálny. U štvorbodovej metódy je rozptýli energiu na prúdových kontaktoch nepodstatný pre meranie napätia na napäťových kontaktoch.

Výstupom merania týmito dvoma metódami je volt-ampérová charakteristika nanoštruktúry. Ak sa závislosť zmeraného prúdu na priloženom napätí riadi Ohmovým zákonom^[23], kedy je uvedená závislosť lineárna a smernica priamky odpovedá prevrátenej hodnote odporu R nanoštruktúry, tak pri známych rozmeroch, konštantnom priemere



Obrázok č.1: Schematické zobrazenie dvojbodovej a štvorbodovej metódy merania.

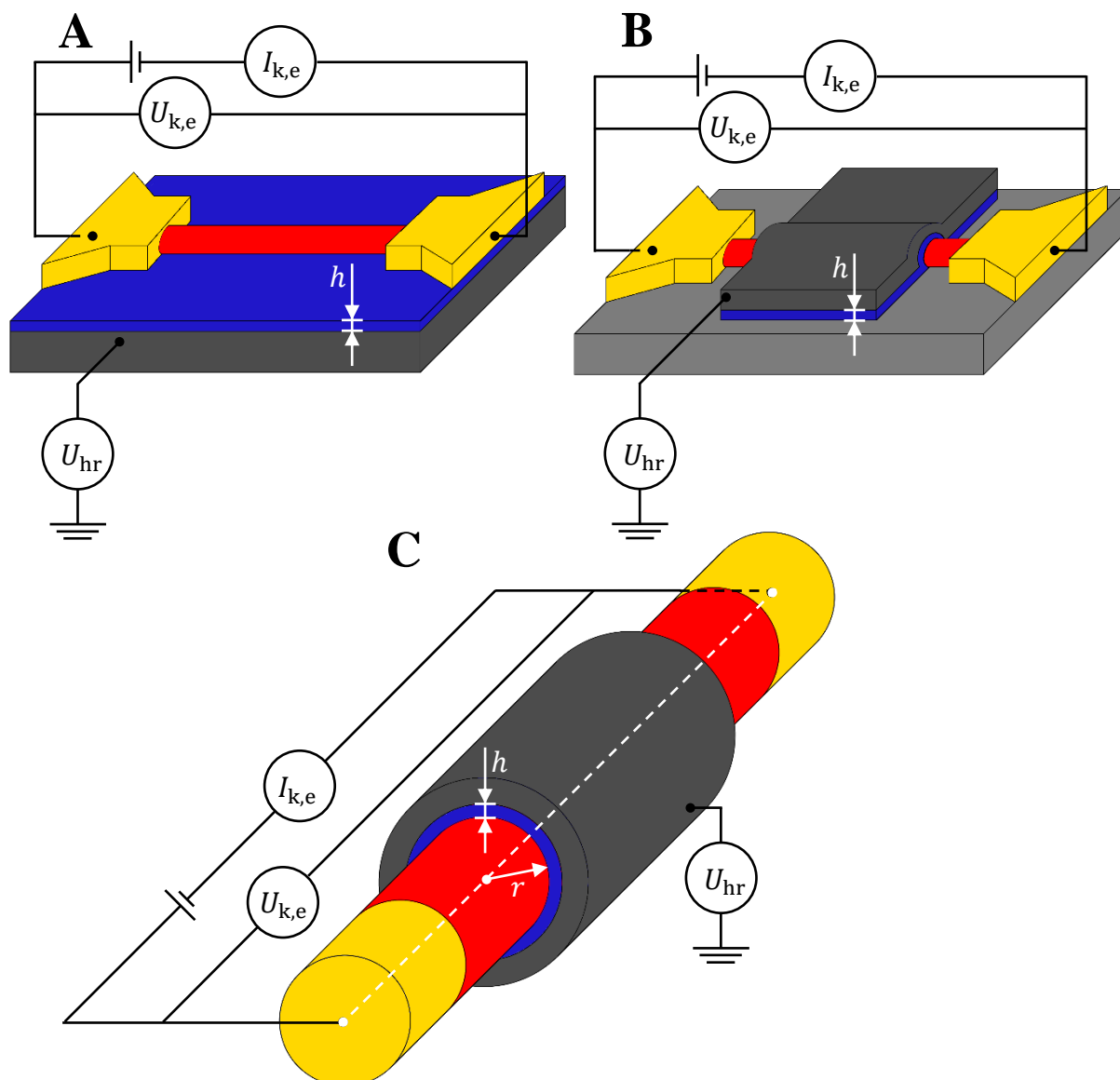
Tmavosivá farba zobrazuje substrát (pre prípad vodivého substrátu sa môže jednať o merania v konfigurácii poľom ovládaného tranzistoru), modrá farba predstavuje dielektrickú vrstvu, žltá farba označuje privedené kontakty a červená farba reprezentuje jednorozmernú nanoštruktúru. Obrázok **A** zobrazuje dvojbodovú metódu, kedy prúd privádzaný na prúdové kontakty je meraný ampérmetrom A a napätie merané voltmetrom V je merané medzi týmito kontaktmi (nepresnosti spôsobené rozptylom energie na prúdových kontaktoch). Obrázok **B** zobrazuje štvorbodovú metódu, kedy je na kontakty pripojené na konce nanoštruktúry (prúdové kontakty) privádzaný prúd meraný ampérmetrom A a napätie na nanoštruktúre merané voltmetrom V je merané pomocou zvyšných dvoch kontaktov (napäťové kontakty). Obrázok **C** ponúka bližší pohľad na výhody použitia štvorbodovej metódy. Časti obvodu sú myšlienkovito nahradené rezistormi s uvedenými odpormi. Vysoký vnútorný odpor voltmetra R_V zabezpečuje, že vetvou s pripojeným voltmetrom V preteká malý prúd. To znamená, že rozptyl energie v tejto vetve v podobe Joulovho tepla je minimálny a zmeraná hodnota napätia lepšie odpovedá skutočnej hodnote na jednorozmernej nanoštruktúre.

nanoštruktúry a predpoklade uniformného poľa elektrickej intenzity naprieč celou nanoštruktúrou je možné spočítať merný odpor daného materiálu vzťahom

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}, \quad (1.1)$$

kde S je plocha prierezu a l je dĺžka nanoštruktúry. Vodivosť materiálu σ je potom prevrátenou hodnotou merného odporu^[23].

Ďalšie podstatné elektrické vlastnosti nanoštruktúr sú koncentrácia nosičov náboja a ich pohyblivosť. Taktiež dôležité je zistiť, ktoré nosiče nábojov sú v nanoštruktúre majoritné a ktoré minoritné. Tieto vlastnosti je možné určiť dvojbodovou alebo štvorbodovou metódou merania v konfigurácii poľom ovládaného tranzistora. Sústava: hradlová elektróda, dielektrická



Obrázok č.2: Schematické zobrazenie umiestnenia hradlovej elektródy. Červenou farbou je znázornená jednorozmerná nanoštruktúra, žltá farba zobrazuje kontakty, modrá farba znázorňuje dielektrickú vrstvu a tmavosivá farba zobrazuje hradlovú elektródu. **A** zobrazuje prípad, kedy je jednorozmerná štruktúra umiestnená navrch hradlovej elektródy s dielektrickou vrstvou, **B** znázorňuje prípad, kedy je dielektrická vrstva a hradlová elektróda vytvorená na jednorozmernej nanoštruktúre a **C** zobrazuje prípad, kedy je dielektrická vrstva a hradlová elektróda umiestnená okolo osi symetrie jednorozmernej nanoštruktúry. U_{hr} znázorňuje napätie privedené na hradlovú elektródu, $I_{k,e}$ znázorňuje prúd prechádzajúci nanoštruktúrou a $U_{k,e}$ znázorňuje napätie na nanoštruktúre. h reprezentuje hrúbku dielektrickej vrstvy a r má význam polomeru jednorozmernej štruktúry aproximovanej valcom.

vrstva a nanoštruktúra tvoria kondenzátor. Voľbou rôznych geometrií systému je možné doceliť vytvorenie kondenzátoru s rôzne veľkou kapacitou. Jednorozmerné nanoštruktúry je, s pomerne veľkou presnosťou, možné aproximovať základnými geometrickými útvarmi ako valec, hranol so štvorcovou podstavou, hranol so šesťuholníkovou podstavou a pod. Všetky tieto útvary, ako aj jednorozmerné nanoštruktúry, majú jeden rozmer výrazne väčší ako zvyšné dva. Ideálnym prípadom umiestnenia hradlovej elektródy je umiestnenie pozdĺž tohto

najväčšieho rozmeru – tzn. v smere kolmom na prierez jednorozmernej nanoštruktúry (obrázok č.2 C). Pre vytvorenie kondenzátora musí byť medzi jednorozmernou nanoštruktúrou a hradlovou elektródou umiestnená ešte dielektrická vrstva. Vhodnou voľbou je dielektrická vrstva s vysokou relatívnou permitivitou a s vysokou dielektrickou pevnosťou (napr. HfO_2 ^[24]). Voľba materiálu s týmito vlastnosťami nám dovoľuje dosiahnuť vysokú kapacitu takto vytvoreného kondenzátora s relatívne malými rozmermi. Predpokladajme, že nanoštruktúru aproximujeme valcom. V takom prípade systém tvorí valcový kondenzátor, ktorého kapacitu môžeme vypočítať podľa nasledujúceho vzťahu^[25]

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{h+r}{r}}, \quad (1.2)$$

kde ϵ_0 je permitivita vákua, ϵ_r je relatívna permitivita dielektrickej vrstvy, h je hrúbka dielektrickej vrstvy, r je polomer a l je dĺžka jednorozmernej nanoštruktúry aproximovanej valcom. Umiestnenie dielektrickej vrstvy a hradlovej elektródy pozdĺž najväčšieho rozmeru (obrázok č.2 C) jednorozmernej nanoštruktúry však nie je jednoduchá úloha. Preto sú zväčša zvolené riešenia síce menej efektívne, ale pritom jednoduchšie na prípravu. Hradlová elektróda a dielektrická vrstva sú vytvorené v planárnej podobe – v podobe tenkých vrstiev – a jednorozmerná nanoštruktúra je jednoducho položená na týchto vrstvách (obrázok č.2 A), poprípade tieto vrstvy jednorozmernú nanoštruktúrou prekrývajú (obrázok č.2 B). Kapacitu pre jednorozmernú nanoštruktúru s dĺžkou najväčšieho rozmeru l (pri zanedbaní zakrivenia podľa vplyvom koncov nanoštruktúry) nad dokonale vodivou platňou s nekonečnými rozmermi vo vzdialenosti $h+r$ obklopenú dielektrickým materiálom s relatívnou permitivitou ϵ_r je možné nájsť v tvare^[25]

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\text{arccosh} \frac{h+r}{r}}, \quad (1.3)$$

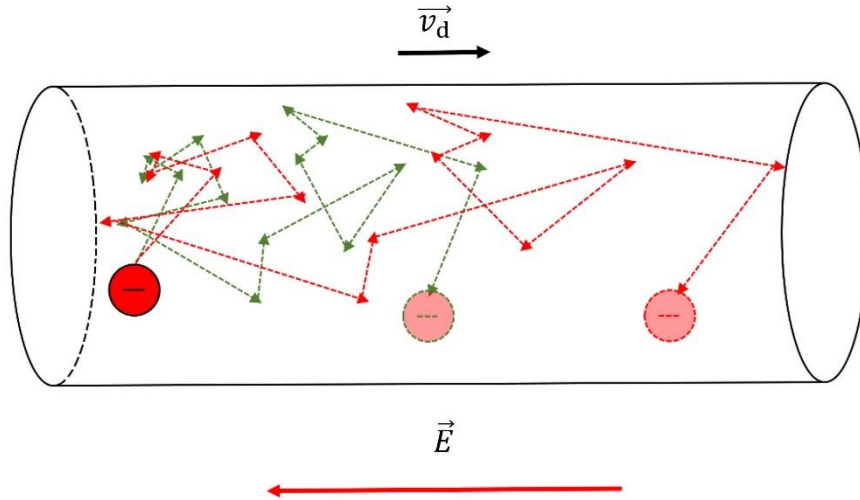
kde pre reálnu situáciu je tento vzťah aproximatívny práve pre konečné rozmery, a pre fakt, že substrát (hradlová elektróda) nie je dokonale vodivý (obrázok č.2 A). Tento vzťah popisuje prípad, kedy je nanoštruktúra obklopená dielektrickým materiálom s relatívnou permitivitou ϵ_r v každom smere, a nezodpovedá teda prípadu zobrazenému na obrázku č.2 A dokonale. Uvedený vzťah je však dobrou aproximáciou, a porovnaním vzťahov (1.2) a (1.3) je možné dokázať, že kondenzátor zobrazený na obrázku č.2 C má vyššiu kapacitu než ten zobrazený na obrázku č.2 A. Napríklad pre pomer hrúbky dielektrickej vrstvy a polomeru jednorozmernej nanoštruktúry aproximovanej valcom rovný šiestim (napríklad $r = 50 \text{ nm}$ a $h = 300 \text{ nm}$), je rozdiel kapacít vypočítaných vyššie uvedenými vzťahmi približne 35%. Tento rozdiel sa zväčšuje so zmenšujúcim sa pomerom polomeru jednorozmernej nanoštruktúry aproximovanej valcom a hrúbky dielektrickej vrstvy.

Za predpokladu známej kapacity systému vieme určiť náboj, ktorý sa indukuje v nanoštruktúre (na elektróde kondenzátora). Z definície kapacity kondenzátora následne vychádza vzťah^[22]

$$Q = CU_{\text{hr}}, \quad (1.4)$$

kde Q je veľkosť celkového náboja indukovaného v nanoštruktúre priložením napätia U na hradlovú elektródu U_{hr} . Náboj ďalej vyjadríme ako celočíselný násobok N elementárneho náboja e . Následne zavedieme koncentráciu indukovaných nosičov náboja ako množstvo elementárneho náboja obsiahnutého v jednotkovom objeme materiálu n :

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N}{\pi r^2 l}, \quad (1.5)$$



Obrázok č.3: Schematické zobrazenie pohybu elektrónu materiálom pred a po priložení elektrického poľa s intenzitou \vec{E} . Zelenou farbou je označená trajektória elektrónu bez prítomnosti vonkajšieho elektrického poľa a červenou je označená trajektória elektrónu za prítomnosti vonkajšieho elektrického poľa. Napriek náhodnému pohybu elektrónu je zrejmé, že po priložení vonkajšieho elektrického poľa sa elektrón dostal ďalej vďaka jeho driftovej rýchlosti v smere opačnom, než smer priloženej elektrickej intenzity. Drift znázornený na obrázku je niekoľkonásobne zväčšený.

kde V je objem, r polomer a l dĺžka jednorozmernej nanoštruktúry aproximovanej valcom. Závislosť koncentrácie nosičov náboja na napätí privedenom na hradlovú elektródu potom dostávame v tvare

$$n = \frac{C}{\pi e l r^2} \cdot U_{hr}. \quad (1.6)$$

Veličiny pohyblivosť nosičov náboja a vodivosť popisujú pohyb nosičov náboja skúmanou nanoštruktúrou pri priložení elektrického poľa (napätí). Pre vysvetlenie pojmu pohyblivosti nosičov náboja je vhodné využiť klasickú fyziku (obrázok č.3). S jej využitím, je možné predstaviť si pevnú látku ako statickú kryštálovú mriežku jadier atómov s viazanými elektrónmi a voľne sa pohybujúce elektróny. Pohyb elektrónov je náhodný – stochastický. Priložením elektrického poľa v materiály vznikne sila pôsobiaca na náhodne sa pohybujúce elektróny. Prítomná sila spôsobuje rovnomerne zrýchlený pohyb. K rovnomerne zrýchlenému pohybu však kvôli zrážkam, nepravidelnostiam alebo defektom v kryštálovej mriežke nedochádza. Podľa Drudeho modelu predpokladáme, že po zrážke bude mať elektrón náhodný smer vektoru rýchlosti a stredná doba medzi jednotlivými zrážkami bude τ . Z pohybovej rovnice potom dostávame vzťah medzi rýchlosťou nosičov náboja (označovanou \vec{v}_d – driftová rýchlosť) a priloženou intenzitou elektrického poľa \vec{E} ^[26]

$$\vec{v}_d = \frac{q\tau}{m} \vec{E}, \quad (1.7)$$

kde q je náboj a m je hmotnosť nosičov náboja. Pohyblivosť nosičov náboja μ je potom definovaná nasledovne^[26]

$$\mu = \frac{q\tau}{m}, \quad (1.8)$$

Dosadením vyššie uvedeného vzťahu pre driftovú rýchlosť do vzťahu vyjadrujúceho prúdovú hustotu $\vec{j} = nq\vec{v}_d$, kde n je koncentrácia nosičov náboja dostávame vzťah^[26]

$$\vec{j} = \frac{nq^2\tau}{m} \vec{E}. \quad (1.9)$$

Statická vodivosť σ je potom definovaná nasledujúcim spôsobom^[26]:

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}. \quad (1.10)$$

Statická vodivosť je taktiež definovaná ako prevrátená hodnota merného odporu. Hodnota vodivosti materiálu, z ktorého je študovaná nanoštruktúra vytvorená, je preto možné určiť z meraní dvojbodovou, respektíve štvorbodovou metódou. Využitím vzťahu medzi pohyblivosťou nosičov náboja μ a statickou vodivosťou σ , vyplývajúceho zo vzťahov (1.8) a (1.10) a dosadením vzťahu (1.6), a využitím hradlovej elektródy pri meraní, môžeme určiť pohyblivosť nosičov náboja nasledujúcim spôsobom

$$\mu = \frac{l^2 \cdot I_{k,e}}{C \cdot U_{k,e} \cdot U_{hr}}, \quad (1.11)$$

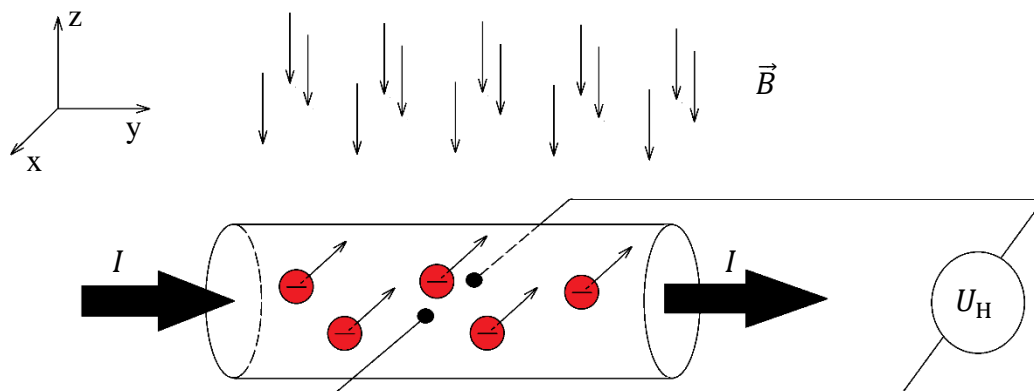
kde $I_{k,e}$ je prúd prechádzajúci jednorozmernou nanoštruktúrou a $U_{k,e}$ je napätie na tejto nanoštruktúre.

1.1.2 Metóda využívajúca Hallov jav

Ďalším spôsobom ako zistiť koncentráciu a pohyblivosť nosičov náboja v jednorozmernej nanoštruktúre je meranie s využitím Hallovho javu. V tomto prípade je prvkom, umožňujúcim meranie koncentrácie a pohyblivosti nosičov náboja, priložené magnetické pole. Jednoduché vysvetlenie je možné s využitím klasickej fyziky. Pri pohybe nanoštruktúrou pôsobí na nosiče náboja Lorentzova sila \vec{F}_L daná vzťahom

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v}_d \times \vec{B}), \quad (1.12)$$

kde q je náboj, \vec{E} intenzita priloženého elektrického poľa, \vec{v}_d je rýchlosť nosičov náboja a \vec{B} je magnetická indukcia priloženého magnetického poľa. Meraciu sústavu nastavíme tak, aby bol vektor magnetickej indukcie \vec{B} kolmý na vektor elektrickej intenzity \vec{E} (obrázok č.4). Elektrická intenzita \vec{E} potom spôsobuje pohyb nosičov náboja jednorozmernou nanoštruktúrou driftovou rýchlosťou \vec{v}_d a magnetická sila následne zakrivuje dráhu nosičov náboja smerom k stene jednorozmernej nanoštruktúry. Táto sila je úmerná vektorovému súčinu $\vec{v}_d \times \vec{B}$. Následkom je hromadenie náboja na stenách jednorozmernej nanoštruktúry. Záporný náboj (elektróny) sa nahromadí na jednej stene. Na protiľahlej stene ostane nevykompenzovaný kladný náboj. Táto separácia nábojov na protiľahlých stenách nanoštruktúry spôsobí dodatočnú elektrickú silu, ktorá pôsobí proti sile magnetickej – zakrivujúcej dráhu elektrónov. Po chvíli dôjde k ustálenému stavu, kedy sa tieto dve sily vyrovnajú a ďalšie nosiče náboja sa už znova budú pohybovať driftovou rýchlosťou \vec{v}_d od jedného konca jednorozmernej nanoštruktúry k druhému. Hallovým napätím U_H sa potom nazýva potenciálový rozdiel medzi protiľahlými stenami jednorozmernej nanoštruktúry. Hallovo napätie je následne možné zmerať pripojením voltmetra na protiľahlé steny jednorozmernej nanoštruktúry. Daná situácia je zobrazená na obrázku č.4. V ustálenom stave – keď sa magnetická sila vyrovná elektrickej sile medzi protiľahlými stenami – je možné vypočítať koncentráciu nosičov náboja priamo z nameraných veličín. S využitím definície prúdovej hustoty a za predpokladu aproximácie jednorozmernej nanoštruktúry valcom s konštantným prierezom dostávame vzťah pre koncentráciu nosičov náboja n v tvare:



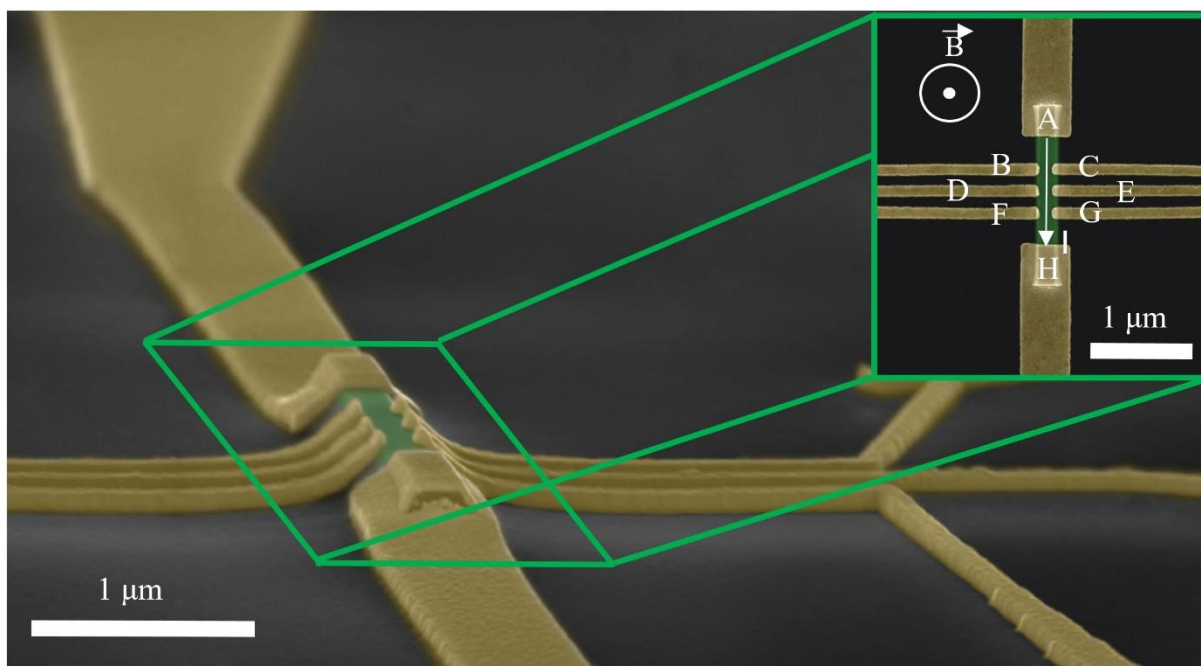
Obrázok č.4: Schematické zobrazenie Hallovho javu v jednorozmernej nanoštruktúre.

Obrázok zobrazuje jednorozmernú nanoštruktúru aproximovanú valcom. Elektróny sú reprezentované červenými guľčkami pohybujúcimi sa v zápornom smere osi y (opačný smer ako smer prúdu). Magnetické pole s magnetickou indukciou \vec{B} smeruje v zápornom smere z . Magnetické pole spôsobuje zakrivenie dráhy elektrónov smerom k zadnej stene jednorozmernej nanoštruktúry. V ustálenom stave je možné medzi protiľahlými stenami namerať potenciálový rozdiel v podobe Hallovho napätia U_H

$$n = \frac{2BI}{\pi q U_H r}, \quad (1.13)$$

kde B je veľkosť magnetickej indukcie magnetického poľa v mieste nanoštruktúry, I je prúd prechádzajúci nanoštruktúrou, q je veľkosť náboja a r je polomer jednorozmernej nanoštruktúry.

Zložitosť praktickej realizácie experimentu s využitím Hallovho javu pre merania elektrických vlastností jednorozmerných nanoštruktúr spočíva primárne v meraní Hallovho napätia medzi stenami nanoštruktúry. Ako už bolo v úvode spomenuté, jednorozmerné nanoštruktúry sú len kvazijednorozmernými štruktúrami (v dvoch dimenziách sú rozmery výrazne obmedzené, avšak nie na nulové hodnoty). Rozmery v obmedzených dimenziách sú však stále veľmi malé (zväčša okolo 100 nm a menej). V praktickej aplikácii to teda znamená privedenie kontaktov na opačné steny jednorozmerných nanoštruktúr práve od seba vzdialených približne 100 nm a menej, bez vzájomného vodivého spojenia daných kontaktov. Takúto presnosť nie je jednoduché v praxi dosiahnuť, a preto sú merania s využitím Hallovho javu v prípade jednorozmerných nanoštruktúr tak zložité na realizáciu^{[27][28]}. Jedna z úspešných realizácií týchto meraní je zobrazená na obrázku č.5.



Obrázok č.5: Usporiadanie experimentu pre meranie elektrických vlastností jednorozmerných nanoštruktúr s využitím Hallovhov javu. Na obrázku je zobrazená jednorozmerná nanoštruktúra, na ktorú je privedených 8 kontaktov (A,B,C,D,E,F,G,H). Pomocou kontaktov A a H je na nanoštruktúru privádzaný prúd. Na kontaktoch B,C,D,E,F a G je merané Hallovo napätie. Pre toto meranie je možné využiť protiľahlé kontakty (dvojice BC, DE, FG ale napríklad aj BG). Pri meraní Hallovhov napätia viacerými dvojicami kontaktov je možné určiť priestorovú (pozdĺž nanoštruktúry) závislosť koncentrácie nosičov náboja, a tým lepšiu charakterizáciu študovanej vzorky (obrázok prevzatý a upravený^[27]).

1.1.3 Pulzné merania

Poslednou metódou popísanou v tejto práci, slúžiacou na určenie elektrických vlastností jednorozmerných nanoštruktúr, je metóda využívajúca pulzy elektrickej intenzity. Merania s pomocou pulzov sú vhodné pre vzorky s malými rozmermi, vzorky ktoré sú krehké a majú problémy so zahrievaním^{[29][31]}. Pulzné merania ďalej zmierňujú jav uväznenia nosičov náboja v dielektriku obklopujúcom nanoštruktúru^{[30][31]}. Túto metódu je možné využiť na jednoduché určenie driftovej rýchlosti nosičov náboja \vec{v}_d . Spôsob určenia driftovej rýchlosti vyššie uvedenými metódami je nepriamy a závisí na interpretácii nameraných hodnôt. Pulzné merania ponúkajú priamočiarejšiu metódu určenia driftovej rýchlosti nosičov náboja. Experimentálne usporiadanie je zobrazené na obrázku č.6.

Pri experimente sú použité dva pulzné generátory a dva osciloskopy. Jeden z pulzných generátorov (pulzný generátor G) je pripojený na konce vzorky (napr. jednorozmernej nanoštruktúry). Pulz vytvorený týmto generátorom spôsobuje elektrické pole medzi koncami vzorky a taktiež prechod prúdu I_0 obvodom. Prechod prúdu vzorkou však spôsobuje zahrievanie vzorky, a keďže pohyblivosť nosičov náboja (a tým aj driftová rýchlosť) závisí na teplote, je žiadúce aby prúd prechádzal vzorkou najkratší možný čas. To je možné docieľiť krátkymi pulzmi z generátoru. Obvod pripojený k vzorke v bodoch C a D slúži na meranie potenciálového rozdielu medzi týmito bodmi na vzorke. Tento obvod je zložitejší než

jednoduché pripojenie voltmetra, ale dovoľuje meranie potenciálového rozdielu v prípade krátkych pulzov. Druhým pulzným generátorom (generátor E) sa do vzorky privádzajú dodatočné nosiče náboja do miesta emitora (bod A na vzorke). Taktiež to znamená prechod dodatočného prúdu I_e obvodom. Moduláciu vodivosti vzorky je možné zanedbať v prípade, že hodnota I_e je dostatočne malá. Dodatočné nosiče náboja privedené na vzorku generátorom E sa začnú vplyvom elektrického poľa vytvoreného generátorom G pohybovať smerom ku kolektoru (bod B na vzorke). Situácia je zachytená na osciloskope O₂. Počiatočný nárast zodpovedá začiatku pulzu z generátora G (potenciálový rozdiel medzi kolektorom a zemou). V bode 1 došlo k začiatku pulzu z generátora E (privedenie dodatočných nosičov náboja emitorm do bodu A na vzorke), čo má za následok ďalší nárast (dodatočný prúd I_e). V bode 2 došlo k príchodu vlny dodatočných nosičov náboja ku kolektoru. Bod 3 označuje čas ukončenia pulzu z generátora E (odpojenie prúdu I_e). Pokles v bode 4 označuje čas príchodu posledných dodatočných nosičov náboja. Z charakteristiky je možné určiť čas prechodu nosičov náboja vzorkou. Rozdiel medzi bodmi 1 a 2 určuje čas prechodu nosičov náboja vzorkou $t_{1,2}$ za prítomnosti kombinácie prúdov I_o a I_e a rozdiel medzi bodmi 3 a 4 určuje čas prechodu nosičov náboja vzorkou $t_{3,4}$ za prítomnosti prúdu I_o ^[32]. Pri vzdialenosti emitora a kolektora L (vzdialenosť bodov A a B na vzorke) je možné spočítať driftovú rýchlosť nosičov náboja jednoduchým vzťahom^[32]:

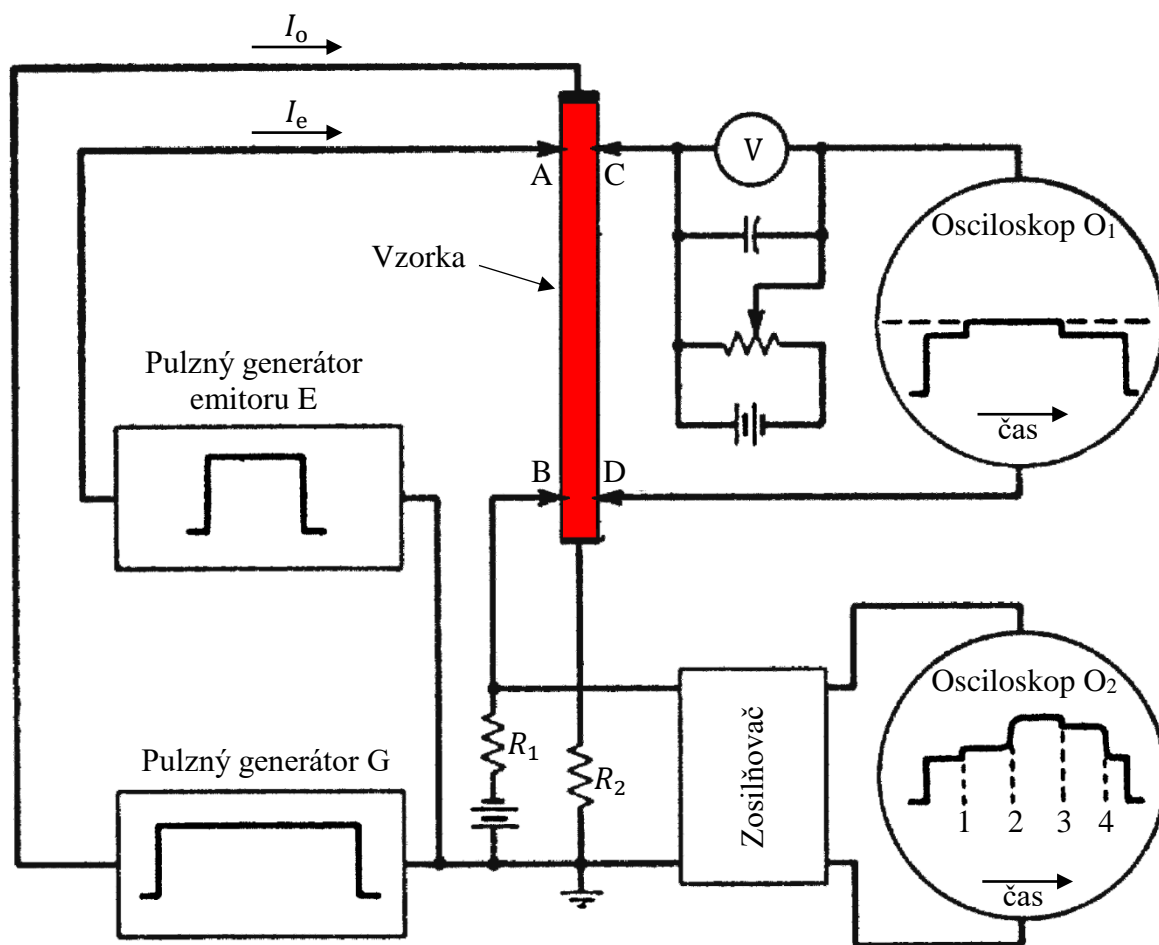
$$\overrightarrow{v_d} = \frac{L}{t_{1,2}}, \quad (1.14)$$

a pohyblivosť nosičov náboja vzťahom^[32]:

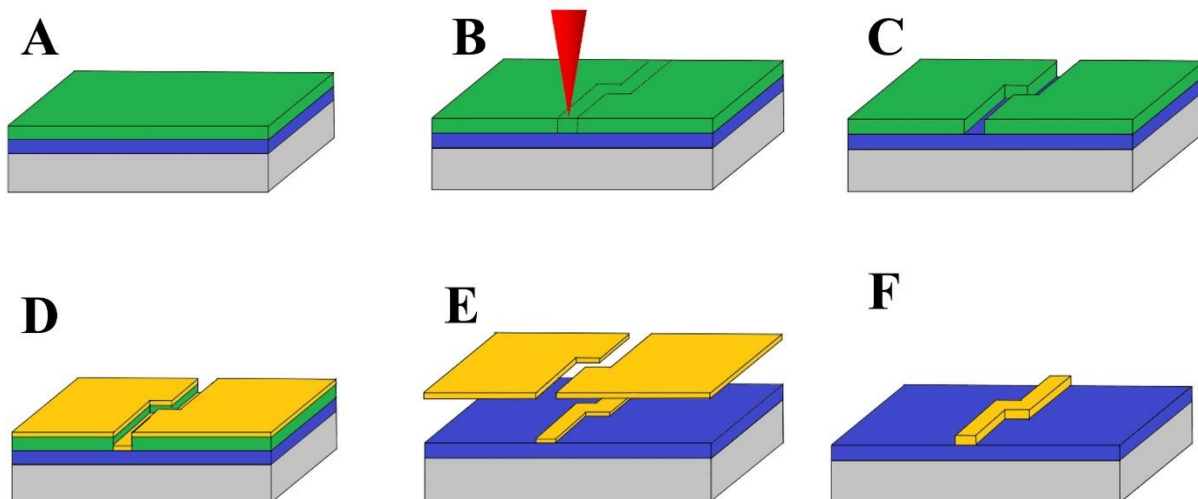
$$\mu = \frac{L^2}{V t_{1,2}}, \quad (1.15)$$

kde V je potenciálový rozdiel medzi bodmi C a D (medzi A a B).

Ako aj u predchádzajúcich metód, aj u tejto dochádza k nepresnostiam v určení hľadaných veličín. Najväčšia nepresnosť spočíva v predpoklade uniformnosti elektrického poľa vo vzorke^[33]. Tento predpoklad v prípade malých vzoriek – jednorozmerných nanoštruktúr – výrazne ovplyvňujú privedené kontakty. Výsledky sú však ovplyvnené aj mnohými ďalšími faktormi. Z hľadiska praktickej realizácie experimentu pre meranie elektrických transportných vlastností jednorozmerných nanoštruktúr sa objavuje podobný problém ako v prípade meraní s využitím Hallova javu. Netriviálna úloha privedenia kontaktov na protiľahlé steny jednorozmernej nanoštruktúry bez ich vzájomného vodivého spojenia.



Obrázok č.6: Schematické zobrazenie zapojenia pre pulzné merania. Zapojenie zobrazené na obrázku bolo použité pre meranie driftovej rýchlosti nosičov náboja vo vzorke kryštálu germánia – vyznačené červenou farbou (prevzaté a upravené^[32]). Pulzný generátor G zabezpečuje potenciálový rozdiel medzi koncami vzorky. Druhým pulzným generátorom E sa privádza krátky pulz nosičov náboja. Tie sa po privedení pulzným generátorom E do bodu A začnú vplyvom potenciálového rozdielu medzi koncami vzorky pohybovať smerom ku kolektoru v bode B. Medzi bodmi C a D je merané napätie na vzorke. Osciloskop O₁ zobrazuje priebeh napätia na vzorke – prvé zvýšenie napätia odpovedá začiatku pulzu pulzným generátorom G, druhé zvýšenie napätia odpovedá začiatku pulzu pulzným generátorom E, následný pokles napätia zodpovedá koncu pulzu z generátora E a posledný pokles odpovedá ukončeniu pulzu z generátora G. Bod 1 na osciloskope O₂ odpovedá začiatku pulzu z generátoru E, bod 2 odpovedá príchodu vlny nosičov náboja do bodu B privedených do bodu A pri začiatku pulzu z generátora E, bod 3 odpovedá ukončeniu pulzu z generátoru E a bod 4 odpovedá príchodu nosičov náboja do bodu B privedených do bodu A tesne pred ukončením pulzu z generátoru E. Pri známej vzdialenosti bodov A a B je z časového rozdielu na osciloskope O₂ medzi bodmi 1 a 2 alebo 3 a 4 možné vypočítať driftovú rýchlosť \vec{v}_d nosičov náboja. Ak je ďalej známy potenciálový rozdiel meraný medzi bodmi C a D, je možné určiť pohyblivosť nosičov náboja μ .



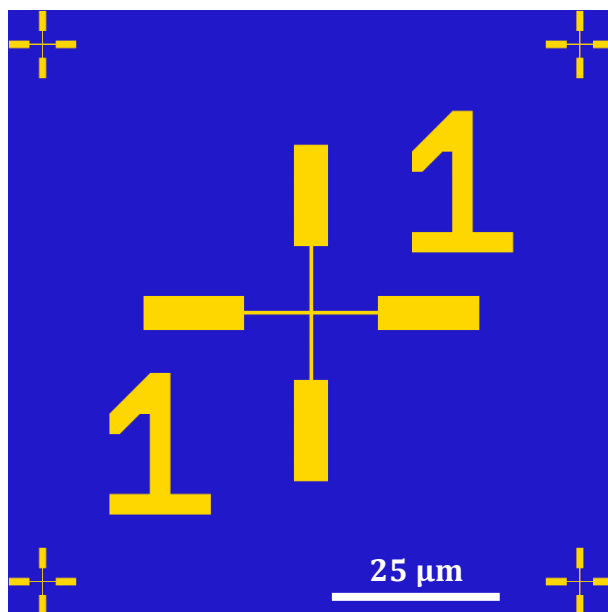
Obrázok č.7: Schematické zobrazenie elektrónovej litografie s priamym zápisom a využitím rezistu^[34]. Sivá farba zobrazuje substrát, modrá farba zobrazuje dielektrickú vrstvu, zelená farba predstavuje rezist a žltá farba predstavuje nanesený kov. Obrázok **A** zobrazuje vrstvu rezistu nanesenú na substráte s dielektrickou vrstvou. Obrázok **B** zobrazuje ožiarenie definovaných častí rezistu elektrónovým zväzkom. Obrázok **C** predstavuje vyvolanie rezistu – odplavenie časti rezistu ožiarenej elektrónovým zväzkom v predchádzajúcom kroku. Na obrázku **D** je na štruktúru pripravenú v predchádzajúcich krokoch nanesená vrstva tvoriaca kontakty – vhodne zvolená kovová vrstva. Obrázok **E** predstavuje krok nazývaný lift-off. V tomto kroku je odstránená neožiarená vrstva rezistu spolu s kovovou vrstvou. Obrázok **F** zobrazuje výslednú štruktúru vytvorenú na substráte s dielektrickou vrstvou pomocou elektrónovej litografie s priamym zápisom a s využitím rezistu.

1.2 Kontaktovanie

Pri meraní elektrických transportných vlastností jednorozmerných nanoštruktúr je úlohou prinášajúcou najviac výziev práve príprava nanoštruktúr na meranie – tzn. privedenie kontaktov na jednorozmernú nanoštruktúru. Postup umožňujúci privedenie kontaktov na vzorky s tak malými rozmermi je litografia. Pre vzorky s väčšími rozmermi (rádovo desiatky mikrometrov) je možné zvoliť rýchlejšiu metódu optickej litografie, avšak pre kontaktovanie jednorozmerných nanoštruktúr v tejto práci bola využitá elektrónová litografia. Elektrónová litografia ponúka dostatočnú presnosť aj pre kontaktovanie jednorozmerných nanoštruktúr s najdlhším rozmerom pod jeden mikrometer. Princíp elektrónovej litografie je zobrazený na obrázku č.7.

Vzorky v tejto práci boli pripravené pre meranie elektrických transportných vlastností dvojbodovou a štvorbodovou metódou (obrázok č.1) s využitím hradlovej elektródy v zostave zobrazenej na obrázku č.2 A. Postup pri vytváraní kontaktov bol nasledujúci.

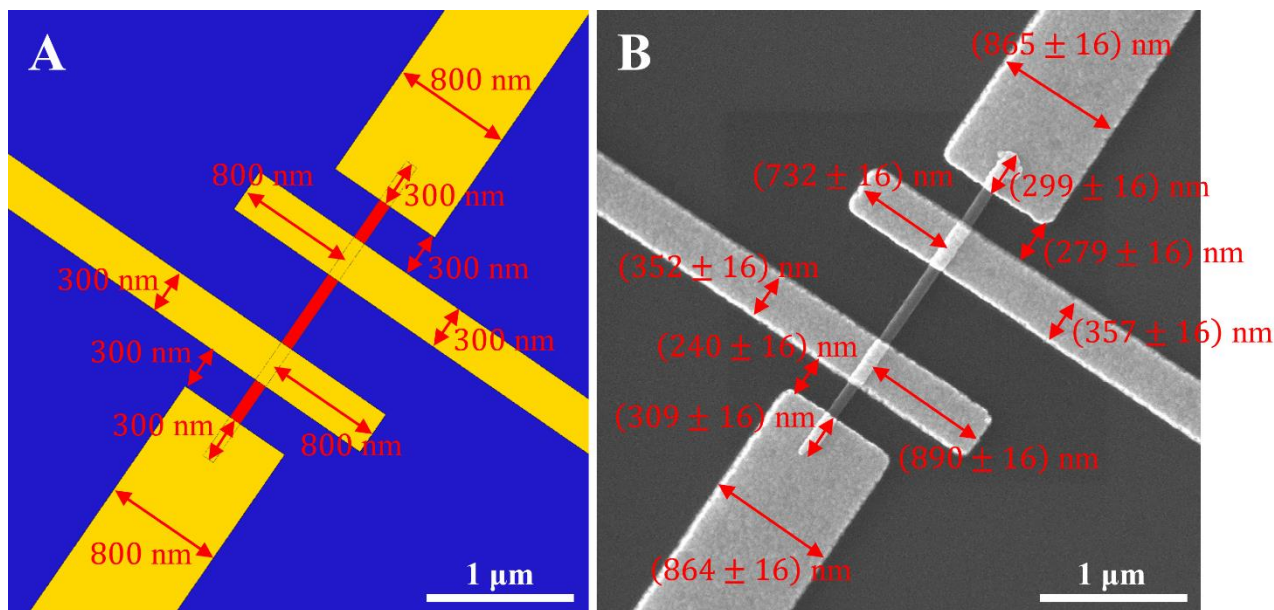
Najprv bola na substráte (jedná sa o dotovaný Si) vytvorená dielektrická vrstva. Prvé vzorky obsahovali dielektrickú vrstvu v podobe približne 258 nm SiO_2 . Následne používané vzorky obsahovali dielektrickú vrstvu skladajúcu sa z približne 258 nm SiO_2 , na ktorú bolo nanesených približne 20 nm HfO_2 .



Obrázok č.8: Návrh zameriavacej značky. Zameriavacie značky tvoria na substráte maticu 6×6 . Ľavé dolné číslo označuje číslo riadka v ktorom sa značka nachádza a pravé horné číslo určuje číslo stĺpca v ktorom sa značka nachádza. Čísla zjednodušujú orientáciu v rámci polohy na substráte. Teoretická vzdialenosť jednotlivých riadkov značiek a teoretická vzdialenosť jednotlivých stĺpcov značiek je 1 mm. Skutočná vzdialenosť ako aj finálny tvar závisia na kvalite litografie. Voľba teoretických rozmerov značky závisí na požiadavke na presnosť pri následnej litografii pri vytváraní kontaktov.

V prvom kroku je nutné na substráte s dielektrickou vrstvou vytvoriť zámerné značky pre budúcu litografiu pri kontaktovaní. Po nanosení jednorozmerných nanoštruktúr na substrát a ich následnom prekrytí rezistom by už nebolo možné tieto nanoštruktúry v elektrónovom mikroskope nájsť. Pri ožiarení rezistu elektrónovým zväzkom by totižto došlo k degradácii rezistu v tomto mieste. Preto bol zvolený prístup zámerných značiek, kde po ich vytvorení a nanosení jednorozmerných nanoštruktúr na takto pripravený substrát sa určí ich vzdialenosť voči najbližšej značke. Pri následnom litografickom vytváraní kontaktov je nájdená daná zámerná značka pod rezistom, a tým je známa taktiež poloha nanoštruktúry. Degradácia rezistu v okolí zámernej značky pri jej pozorovaní v elektrónovom mikroskope už nie je problémom, keďže kontakty budú vytvárané na inom mieste. Zámerná značka bola zvolená tak, aby jej tvar rozpoznal softvér Raith Elphy Plus použitý pri litografii na prístroji Tescan MIRA3/Raith LIS. Rozmery značky boli zvolené tak, aby bola dosiahnutá požadovaná presnosť následnej litografie pri vytváraní kontaktov. Značky boli na substráte umiestnené do matice 6×6 . Teoretická vzdialenosť jednotlivých stĺpcov ako aj jednotlivých riadkov bola 1 mm. Skutočné rozmery a aj vzdialenosti jednotlivých značiek závisia na kvalite litografie a krokov s ňou spojených, popísaných na obrázku č.7. Zámerná značka je zobrazená na obrázku č.8. Materiál, z ktorého sú značky vyrobené, je volený tak, aby mal v elektrónovom mikroskope dobrý kontrast aj pod vrstvou rezistu. V tomto prípade sa jedná o vrstvu približne 5 nm Ti ako adhézna vrstva, približne 90 nm Cu a povrchovú vrstvu tvorí približne 10 nm Au pre zabránenie oxidácie vrstvy Cu.

Po vytvorení zámerných značiek sú na substrát s dielektrickou vrstvou nanosené jednorozmerné nanoštruktúry. Najprv sú nanoštruktúry oddelené od substrátu na ktorom boli pripravené. To je realizované ponorením do roztoku (v tomto prípade etanol) a aplikovaním ultrazvuku. Následne je roztok s oddelenými nanoštruktúrami zriedený pre docielenie požadovanej koncentrácie. Jednorozmerné nanoštruktúry rozptýlené v roztoku sú nanosené na



Obrázok č.9: Výsledky optimalizácie litografie pri kontaktovaní. Obrázok A zobrazuje návrh kontaktov spolu s vyznačenými teoreticky presnými hodnotami, ktoré majú byť pri litografii dosiahnuté. Obrázok B zobrazuje kontakty po litografii pozorované v rastrovacom elektrónovom mikroskope. Neistota je odvodená z rozlíšenia obrázku (veľkosť pixelu) a zo schopnosti rozpoznania hrán na obrázku. Je zrejmé, že rozmery uspokojivo odpovedajú zamýšľaným rozmerom nastaveným v návrhu. Kontakty sú posunuté mierne vpravo dole, čo je pravdepodobne spôsobené nepresnosťami pri zameriavaní polohy jednorozmernej nanoštruktúry voči zámernej značke a následnému zameriavaniu návrhu voči zámernej značke pred litografiu. Taktiež je vidieť, že hrúbky kontaktov sú mierne väčšie než bolo zamýšľané, čo je pravdepodobne spôsobené použitím mierne vyššej dávky pri ožarovaní elektrónovým zväzkom (obrázok č.7 B) alebo nevhodne zvoleným časom ponechania vzorky vo vývojke pri následnom odstraňovaní týchto ožiarených oblastí (obrázok č.7 C).

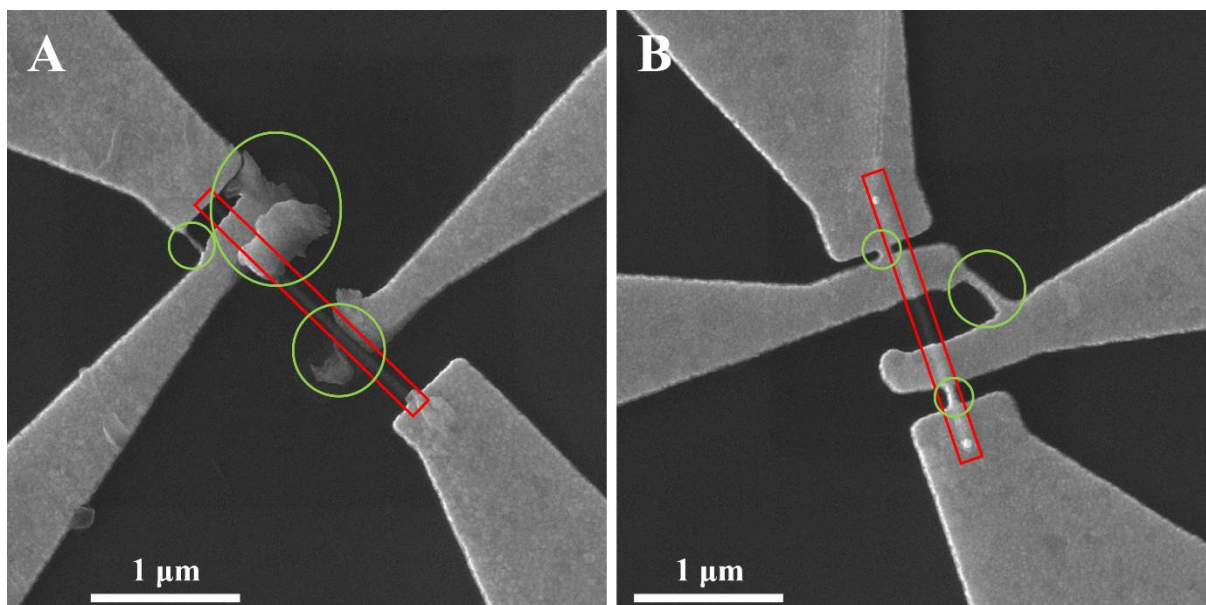
prípravený substrát. Pre odparenie zvyšného etanolu je substrát zahriaty na 80°C po dobu jednej minúty.

Nasleduje hľadanie jednorozmerných nanoštruktúr vhodných pre nakontaktovanie a určenie ich polohy vzhľadom k najbližšej zámernej značke. Vhodné nanoštruktúry sú jednorozmerné nanoštruktúry ktoré sú samostatne ležiace na substráte, majú približne konštantný priemer a dostatočne veľké rozmery. Pre privedenie štyroch kontaktov sú ideálne jednorozmerné nanoštruktúry s minimálnou veľkosťou najdlhšieho rozmeru 2 μm. Dôležitosť presného určenia polohy nanoštruktúry voči zámernej značke rastie so zmenšujúcimi sa rozmermi nanoštruktúr. Po optimalizácii celého procesu litografie a zameriavania polohy jednorozmerných nanoštruktúr bola dosiahnutá potrebná presnosť (obrázok č.9). Z obrázku č.9 je zrejmé, že dosiahnutá presnosť je plne dostačujúca pre privedenie štyroch kontaktov na jednorozmernú nanoštruktúru s najdlhším rozmerom približne 2 μm a viac. Kontakty sú v porovnaní s návrhom mierne posunuté vpravo dole. Zameriavanie polohy jednorozmerných nanoštruktúr voči zámerným značkám je vždy realizované s neistotou. Neistota sa uplatňuje taktiež pri následnom posunutí sa do miesta litografie po nájdení zámernej značky pod rezistom. Posunutie kontaktov pozorované na uvedenom obrázku (obrázok č.9 B) je výsledkom týchto nepresností. Tieto nepresnosti je ďalej možné zredukovať, avšak dosiahnutá presnosť je dostačujúca. Z odmeraných vzdialeností je taktiež zrejmé, že rozmery vytvorených kontaktov sú mierne väčšie než bolo zamýšľané. Tento jav môže mať viacero dôvodov. Prvým dôvodom je chybné nastavenie parametrov litografie. Jedným z parametrov každého rezistu je dávka

elektrónov potrebná na to, aby v danom mieste došlo k degradácii rezistu, a tým k vytvoreniu požadovaných útvarov elektrónovým zväzkom. Pri litografii sa následne požadovaný útvar vytvorí tak, že na plochu na reziste o veľkosti stopy elektrónového zväzku je aplikovaný elektrónový zväzok tak dlho, aby bola na dané miesto privedená požadovaná dávka elektrónov. Následne sa elektrónový zväzok presunie na iné miesto na reziste, ktoré má byť ožiarené, a postupne je vytvorený celý požadovaný útvar. Príliš vysoká dávka elektrónov spolu s ďalšími krokmi litografie môže mať za následok, že rozmery sú v skutočnosti väčšie než bolo zamýšľané. V ďalšom kroku sa odstraňuje práve degradovaná časť rezistu (v prípade pozitívneho rezistu). To je pre prípad použitého rezistu AR-P 679,04 docieľené ponorením vzorky s rezistom a vytvorenými útvarmi do predpripraveného roztoku organických rozpúšťadiel AR 600-56 na určitú dobu. Pri ponechaní vzorky v roztoku príliš dlhý čas dôjde k odplaveniu rezistu aj zo stien útvarov vytvorených v reziste, čo môže mať za následok práve zväčšenie ich rozmerov. Posledným dôvodom je chyba zameriavania pred litografiou. Ako už bolo spomenuté vyššie, všetky rozmery sú vytvárané s neistotou, závislou na kvalite zameriavania. Aj tento jav je možné zredukovať, avšak dosiahnutá presnosť je dostačujúca. Pri menších rozmeroch a útvaroch bližšie pri sebe sa začnú výraznejšie prejavovať ďalšie efekty ovplyvňujúce dosiahnutie požadovanej presnosti litografie.

Po litografii a odplavení degradovaných častí rezistu nasleduje nanosenie kovovej vrstvy, z ktorej budú kontakty vytvorené. Voľba vhodného kovu bude diskutovaná v nasledujúcej časti. Dôležitá je však taktiež výška vrstvy nanoseného kovu. Bolo zistené, že je ideálne voliť výšku vrstvy nanoseného kovu tak, aby hodnota výšky rezistu, ktorý ostal na vzorke bola približne o minimálne trojnásobok vyššia ako zamýšľaná vrstva nanoseného kovu. Pre prípad vzoriek diskutovaných v tejto práci bola výška rezistu volená na teoretickú hodnotu 400 nm. Hodnota výšky rezistu je len teoretická. Reálne merania výšky rezistu neboli realizované. Následná hodnota výšky kovovej vrstvy bola zamýšľaná na hodnotu 100 nm. Presné merania neboli realizované, keďže dosiahnuť presnú hodnotu nie je pre ďalšie kroky zásadné. Prezentovaný pomer výšky rezistu a kovovej vrstvy uľahčuje nasledujúci krok popísaný v nasledujúcom odstavci.

Ďalší krok je nazývaný lift-off a odstraňuje sa pri ňom zvyšný rezist spolu s kovovou vrstvou na ňom nanosenou aby na vzorke ostala len kovová vrstva na požadovaných miestach (v miestach vytvorených pri litografii, z ktorých bol v následnom kroku rezist odstránený). Tento krok je z celého procesu najkritickejší. Pre použitý typ rezistu je tento krok realizovaný ponorením vzorky do acetónu a následným opláchnutím prúdom acetónu, opláchnutím isopropyl-alkoholom a destilovanou vodou. Práve pri tomto kroku sa môžu vytvorené štruktúry najjednoduchšie poškodiť. Pri zvolení pomeru rezistu a nanesej kovovej vrstvy výrazne menšieho ako bol prezentovaný vyššie v texte dochádzalo buď k odstráneniu kontaktov spolu s kovovou vrstvou nachádzajúcou sa na zvyšnom reziste, alebo kontakty ostávali na vzorke spolu s vrstvou ktorá bola pôvodne nanosená na reziste. V tomto prípade sa rezist spod kovovej vrstvy odplavil a kovová vrstva priľnula k povrchu vzorky aj na miestach, kde nebola zamýšľaná. Aj pri zvolení prezentovaného pomeru výšok rezistu a kovovej vrstvy občas dochádzalo k nežiadúcim javom (obrázok č.10). V niektorých prípadoch dochádzalo k odlomeniu celých častí kontaktu a ich odplavení buď úplne mimo vzorku (do roztoku), alebo došlo k ich prichyteniu na inú časť vzorky (obrázok č.10 A). K odstráneniu zvyšného rezistu spolu s nežiadúcou kovovou vrstvou je s dosiahnutím lepších výsledkov možné využiť ultrazvuk. Avšak so zmenšujúcimi sa rozmermi kontaktov sa zvyšuje pravdepodobnosť ich odlomenia. Nežiadúci jav, ktorý bol najčastejšie pozorovaný je zobrazený na obrázku č.10 B. Jedná sa o neúplné odstránenie kovovej vrstvy nanesej na zvyšnom reziste. Po neúplnom odstránení môže medzi jednotlivými kontaktmi ostať vodivé prepojenie. Tieto prepojenia boli pozorované pri vzorkách, kde boli jednotlivé kontakty príliš blízko seba. Primárne z toho dôvodu sú na kontaktovanie štvorbodovou metódou vhodné jednorozmerné nanoštruktúry



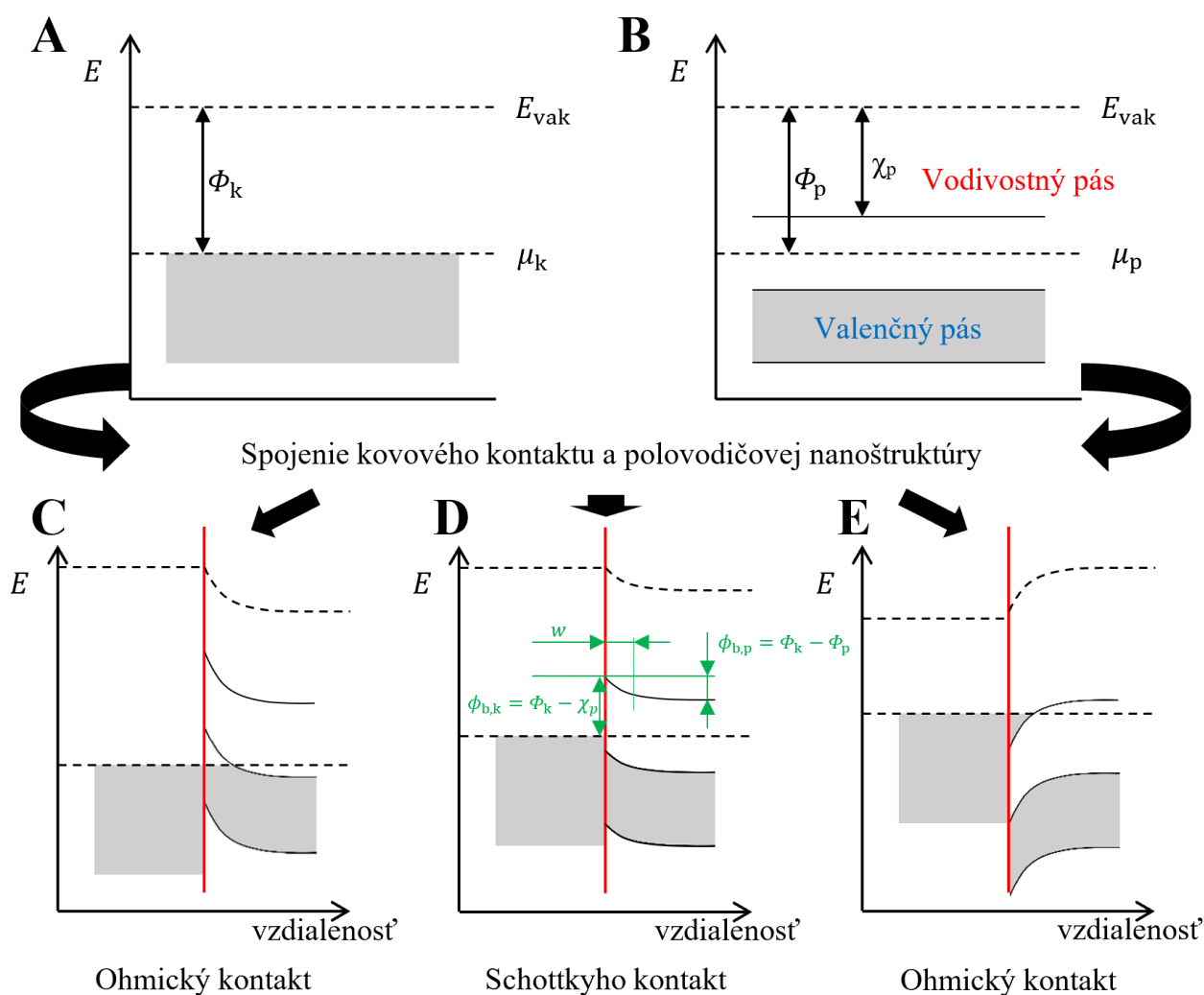
Obrázok č.10: Typické porušenie kontaktov pri kroku nazývanom lift-off. Jednorozmerné nanoštruktúry sú zvýraznené v červenom ráme (jedná sa o nanodrôty InAs) a zelenými elipsami sú zvýraznené poškodenia kontaktov. Na obrázku **A** je zobrazené odlomenie časti kontaktu a jeho presunutie na iné miesto. Obrázok **B** zobrazuje najčastejší prípad nežiadúceho javu vyskytujúceho sa primárne v prípade, že sú jednotlivé kontakty blízko pri sebe. Pri odstraňovaní zvyšného rezistu spolu s kovovou vrstvou na ňom nanosenou nedošlo k úplnému odstráneniu tejto kovovej vrstvy, čo má za následok vodivé prepojenie jednotlivých kontaktov.

s najdlhším rozmerom minimálne, približne 2 μm . Toto je taktiež jeden z najpodstatnejších problémov pri snahe pripraviť jednorozmerné nanoštruktúry na merania s použitím Hallovhov javu alebo pre pulzné merania. Privedenie kontaktov presne na protiľahlé steny jednorozmernej nanoštruktúry bez ich vzájomného vodivého spojenia je netriviálna úloha.

1.3 Špecifikácie kontaktovania

U všetkých vyššie uvedených metód určenia elektrických transportných vlastností nosičov náboja je snaha o dosiahnutie ohmického spojenia (kontaktu) medzi kontaktom a nanoštruktúrou. Ohmický kontakt umožňuje prechod prúdu pri oboch polaritách privedeného napätia vykazujúc rovnakú volt-ampérovú charakteristiku pre obe polarizácie. Druhým typom spojenia je usmerňujúci kontakt (často nazývaný Schottkyho kontakt), pri ktorom bude prechod prúdu umožnený jedným smerom výrazne lepšie než smerom druhým (volt-ampérová charakteristika pre jednotlivé polarizácie sa bude líšiť). Pre vysvetlenie bude v nasledujúcom texte uvedený bližší pohľad na problematiku.

Situácia je popísaná na obrázku č.11. Jednou z najdôležitejších charakteristík každého kovu je Fermiho energia E_f . Pri absolútnej nule $T = 0\text{ K}$ sú všetky stavy pod hodnotou Fermiho energie obsadené a všetky stavy nad touto hodnotou ostávajú neobsadené. Pri teplote $T > 0\text{ K}$ dôjde k excitácii niektorých elektrónov z blízkeho okolia Fermiho hladiny do vyšších (neobsadených) stavov vplyvom tepelnej excitácie (vibrácie mriežky vplyvom zvýšenej teploty). Hodnota Fermiho energie pri teplotách $T > 0\text{ K}$ je označovaná ako chemický potenciál μ_k . U kovov sa chemický potenciál so zvyšujúcou sa teplotou veľmi nemení, preto sa tieto veličiny často zamieňajú. Druhou podstatnou charakteristikou kovu je výstupná práca Φ_k . Je

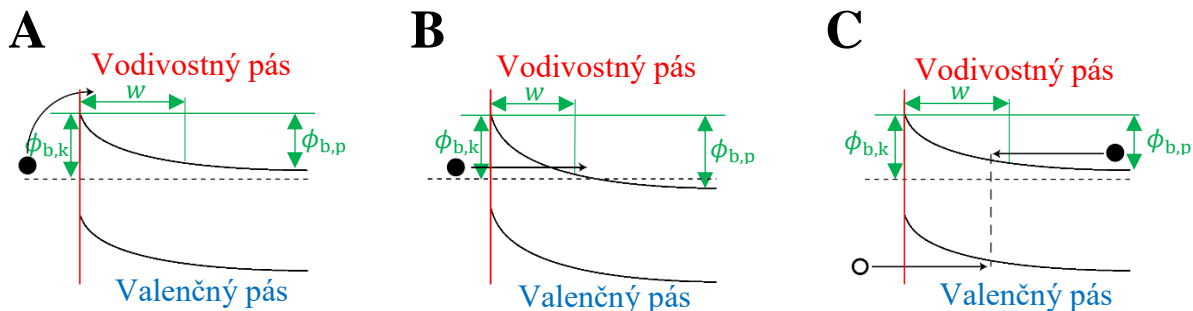


Obrázok č.11: Schematické zobrazenie spojenia kovu a polovodiča. **A** zobrazuje pásovú štruktúru kovu. E označuje energiu (elektrónu/diery), E_{vak} označuje energetickú hladinu vákua, Φ_k označuje výstupnú prácu daného kovu a μ_k označuje chemický potenciál daného kovu (u kovov pri pokojovej teplote málo líšiaci sa od Fermiho energie E_f). **B** zobrazuje pásovú štruktúru intrinzického polovodiča. Na obrázku je vyznačený valenčný a vodivostný pás, medzi ktorými sa nachádza pásmo zakázaných energií. Sivou farbou sú u všetkých obrázkov vyznačené stavy obsadené elektrónmi. μ_p označuje hodnotu chemického potenciálu daného polovodiča, Φ_p označuje výstupnú prácu daného polovodiča a χ_p označuje elektrónovú afinitu daného polovodiča (rozdiel medzi spodným okrajom vodivostného pásu a energetickou hladinou vákua). Obrázky **C**, **D** a **E** označujú spojenia kovu a polovodiča pre rôzne hodnoty výstupných prác kovu a polovodiča. Ak sa hodnota chemického potenciálu kovu μ_k (Fermiho energie E_f) nachádza v páse zakázaných energií polovodiča dôjde k Schottkyho kontaktu (**D**). $\phi_{b,k}$ označuje potenciálovú bariéru pre prechod elektrónov z kovu do polovodiča, $\phi_{b,p}$ označuje potenciálovú bariéru pri opačnom prechode a w označuje ochudobnenú oblasť. V zvyšných dvoch prípadoch dôjde k ohmickému kontaktu. Ak hodnota chemického potenciálu kovu μ_k leží pod hodnotou horného okraja valenčného pásu polovodiča dôjde k ohmickému kontaktu (pre diery) – obrázok **C**. A ak naopak hodnota chemického potenciálu kovu μ_k leží nad hodnotou spodného okraja vodivostného pásu polovodiča dôjde k ohmickému kontaktu (pre elektróny) – obrázok **E**.

definovaná ako rozdiel energie chemického potenciálu μ_k a energetickej hladiny vákua E_{vak} . U kovu teda odpovedá energii potrebnej na excitáciu elektrónu z materiálu do vákua. Pásová štruktúra polovodičov obsahuje valenčný pás a vodivostný pás, medzi ktorými sa nachádza pás zakázaných energií. V prípade intrinzičných polovodičov dostávame elektróny vo vodivostnom páse vplyvom tepelnej excitácie. Koncentrácia nosičov náboja vo vodivostnom páse polovodičov vplyvom tepelnej excitácie je však podstatne menšia než koncentrácia nosičov náboja v kovoch. Pre intrinzičný polovodič, ktorý má rovnaký počet elektrónov vo vodivostnom páse a dier vo valenčnom páse sa chemický potenciál nachádza v strede pásu zakázaných energií pri akejkoľvek teplote. Pridaním atómov prímiesí do intrinzičného polovodiča je možné podstatne zvýšiť koncentráciu nosičov náboja, stále je však táto koncentrácia výrazne nižšia než u kovov. U extrinzičných polovodičov je závislosť chemického potenciálu na teplote výrazne iná než u intrinzičných polovodičov. Pre polovodič typu n leží hodnota chemického potenciálu pri absolútnej nule medzi donorovou hladinou a spodným okrajom vodivostného pásu. Už pri nízkych teplotách dochádza k excitácii donorových elektrónov a k poklesu chemického potenciálu smerom k stredu pásu zakázaných energií. Pri vysokých teplotách dôjde k úplnej excitácii donorových elektrónov a chemický potenciál poklesne na hodnotu stredu pásu zakázaných energií. U polovodičov typu p je mechanizmus podobný. Pri absolútnej nule leží hodnota chemického potenciálu v strede medzi akceptorovou hladinou a vrchným okrajom valenčného pásu a so zvyšujúcou sa teplotou stúpa k stredu pásu zakázaných energií. Pri vysokých teplotách sa preto strácajú rozdiely dosiahnuté dotáciou polovodiča. U polovodičov sa okrem výstupnej práce Φ_p , ktorá odpovedá rozdielu energie chemického potenciálu μ_p a energetickej hladiny vákua E_{vak} , definuje aj elektrónová afinita χ_p , ktorá vyjadruje rozdiel medzi dnom vodivostného pásu a energetickou hladinou vákua E_{vak} . Tým určuje energiu potrebnú na excitáciu elektrónu z materiálu do vákua podobne ako u kovu výstupná práca Φ_k [15].

V závislosti na hodnote výstupnej práce kovu Φ_k , výstupnej práce polovodiča Φ_p a elektrónovej afinity polovodiča χ_p je možné spojením kovu a polovodiča dosiahnuť buď ohmický kontakt, alebo Schottkyho kontakt. Spojením dochádza k vyrovnaniu chemických potenciálov v oboch materiáloch. Pre vyrovnanie chemických potenciálov dôjde k prechodu elektrónov buď z polovodiča do kovu, alebo opačne, v závislosti na rozdieli Φ_k a Φ_p . Prechod náboja taktiež spôsobí zakrivenie pásovej štruktúry polovodiča na rozhraní. Zakrivenie pásovej štruktúry kovu je vďaka výrazne vyššiemu počtu voľných elektrónov zanedbateľné, a preto je možné považovať pásovú štruktúru kovu za nezmenenú. Pásová štruktúra polovodiča ďaleko od rozhrania ostáva nezmenená, okrem jej posunutia ako celku nadol, poprípade nahor, v závislosti na rozdieli hodnôt Φ_k a Φ_p . V prípade, že sa hodnota chemického potenciálu kovu nachádza pod hodnotou horného okraja valenčného pásu, dôjde k ohmickému kontaktu pre diery – pre polovodič typu p (obrázku č.11 C). V prípade, že sa hodnota chemického potenciálu kovu nachádza nad hodnotou spodného okraja vodivostného pásu dochádza k ohmickému kontaktu pre elektróny – pre polovodič typu n (obrázku č.11 E). V praxi je cieľom dosiahnuť práve ohmický kontakt, pretože má minimálny odpor vzhľadom k odporu jednorozmernej nanoštruktúry. Prúd taktiež prechádza v oboch smeroch, pretože v oboch priložených polaritách bude dostatok nosičov náboja prechádzať z polovodiča do kovu a naopak. V praktických aplikáciách kontaktu privedeného na jednorozmernú nanoštruktúru však nie je ľahké ohmický kontakt dosiahnuť [35].

V prípade, že sa hodnota chemického potenciálu kovu nachádza v páse zakázaných energií polovodiča, dochádza k Schottkyho kontaktu (obrázku č.11 D). Pri nenulovej teplote sa vo vodivostnom páse polovodiča nachádzajú elektróny. Po spojení polovodiča a kovu prejdú tieto elektróny z blízkeho okolia rozhrania do kovu a vytvorí sa tak ochudobnená oblasť w , v ktorej sa budú nachádzať len nepohyblivé kladne nabité zvyšky atómov mriežky.

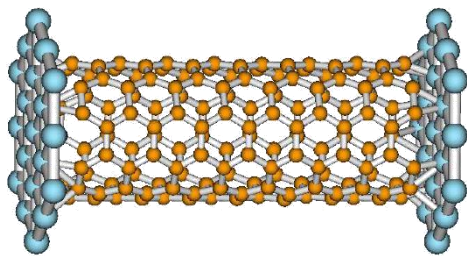
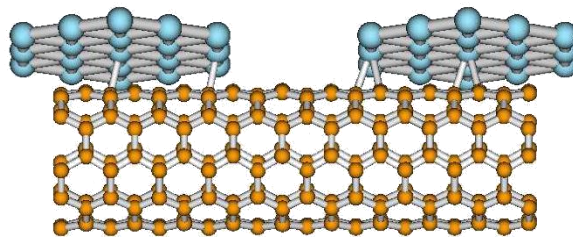


Obrázok č.12: Schematické zobrazenie prechodu náboja cez rozhranie kovu a polovodiča v prípade Schottkyho kontaktu. Červená zvislá čiara označuje rozhranie kov/polovodič. V polovodiči je vyznačený vrchný okraj valenčného pásu a spodný okraj vodivostného pásu. Ďalej sú vyznačené výšky potenciálových bariér $\phi_{b,k}$, $\phi_{b,p}$ a ochudobnená oblasť w s významom podľa obrázka č.11. Čierna plná guľička označuje elektrón a biela guľička označuje dieru. Šípkami je naznačený prechod cez potenciálovú bariéru (prevzaté a upravené^[35]). **A** zobrazuje tepelnú excitáciu elektrónov ponad potenciálovú bariéru, **B** zobrazuje prechod elektrónov cez potenciálovú bariéru tunelovaním a **C** zobrazuje rekombináciu elektrónov a dier v ochudobnenej oblasti.

Pri jednoduchom pohľade na problematiku potenciálovej bariéry, bez uváženia povrchových stavov, bude prechodu elektrónov z kovu do polovodiča pri n type polovodičov brániť potenciálová bariéra $\phi_{b,k} = \Phi_k - \chi_p$ a pri opačnom prechode budú musieť elektróny prekonať potenciálovú bariéru o veľkosti $\phi_{b,p} = \Phi_k - \Phi_p$.

Otázkou teda ostáva, ako bude prechod cez danú potenciálovú bariéru vyzerat'. Tri hlavné mechanizmy prechodu nosičov náboja cez rozhranie kovu a polovodiča sú zobrazené na obrázku č.12. Jedná sa tepelnú excitáciu elektrónov ponad potenciálovú bariéru (pre prípad prechodu elektrónov z kovu do polovodiča sa jedná o bariéru $\phi_{b,k}$ – obrázky č.11 a č.12), tunelovanie elektrónov cez túto bariéru a rekombinácia elektrónov v ochudobnenej oblasti polovodiča. Pri tepelnej excitácii elektróny prijímajú energiu z vibrácií mriežky (absorbciou fonónov) a sú excitované ponad potenciálovú bariéru. Počet tepelne excitovaných elektrónov závisí na priloženom napätí exponenciálne. Kvantovo-mechanické tunelovanie cez bariéru taktiež závisí na priloženom napätí exponenciálne, avšak je nezávislé na teplote. Posledným dôležitým mechanizmom je rekombinácia elektrónov a dier v ochudobnenej oblasti. Elektróny a diery sa môžu v tejto oblasti rekombinovať buď priamo, alebo cez defekty v mriežke. V závislosti na výške potenciálovej bariéry, defektoch v mriežke a pod., v danej sústave kov/polovodič prevláda jeden z mechanizmov, alebo je prechod náboja cez rozhranie výsledkom kombinácie viacerých. V prípade Schottkyho kontaktu sa jedná o kontakt, ktorý nespĺňa Ohmov zákon^[23], a preto je voľba kovu použitého na kontakty tak dôležitá^[35].

Voľba vhodného kovu na kontaktovanie polovodičových nanoštruktúr závisí na type polovodiča. Skutočnosť, či je polovodič intrinzičný alebo zámerne, či nezámerne, dotovaný je preto pre kontaktovanie dôležitá a je výhodné túto skutočnosť poznať už pred voľbou vhodného kovu. Aj pri zvolení kovu s vhodnou hodnotou výstupnej práce voči hodnote výstupnej práce a elektrónovej afinity polovodiča nie je ohmický kontakt zaručený. Pri vyššie uvedenej úvahe ohnutia pásovej štruktúry polovodiča v oblasti rozhrania bol braný do úvahy jednoduchý model a nebol uvážený vplyv povrchových stavov, stavov vytvorených spojením s kovovým kontaktom a iných mechanizmov. Ďalším dôvodom vzniku Schottkyho kontaktu sú nedokonalosti procesu kontaktovania samotného. Pri prenose jednorozmerných nanoštruktúr zo substrátu, na ktorom boli pripravené, na substrát so zámernými značkami, sú nanoštruktúry ponorené do vhodného roztoku a následne sú vystavené ultrazvuku pre ich oddelenie. V prípade

A**B**

Obrázok č.13: Schematické zobrazenie dvoch možností privedenia kontaktov na jednorozmernú nanoštruktúru (prevzaté a upravené^[38]). **A** zobrazuje privedenie kontaktov na konce nanoštruktúry tak, že sú jej pokračovaním – koncové kontakty. **B** zobrazuje kontakty privedené na steny nanoštruktúry – bočné kontakty. Na obrázkoch je naznačené spojenie uhlíkovej nanotrubic (reprezentovaná hnedými guľčkami) s atómami kovu kontaktu (reprezentovanými modrými guľčkami).

jednorozmerných nanoštruktúr uvedených v tejto práci do etanolu. Roztok s jednorozmernými nanoštruktúrami oddelenými od substrátu je nakvapkaný na substrát so zámernými značkami a zahriaty na teplotu približne 80 °C po dobu jednej minúty za účelom odparenia etanolu. Mohlo však dôjsť k chemickej reakcii etanolu a vzorky, k reakcii etanolu s prostredím alebo k tepelnému rozkladu etanolu^[36] a tým ostala na povrchu nanoštruktúry tenká vrstva nežiadúcich molekúl. Ďalším zdrojom kontaminácií je pozorovanie nanoštruktúr elektrónovým zväzkom. Vplyvom elektrónového zväzku dochádza k chemickým reakciám medzi nanoštruktúrou a nečistotami v komore, čo na povrchu vzorky zanecháva ďalšiu neželanú vrstvu^[37]. V neposlednom rade môžu na povrchu vzorky (medzi oblasťou kam bude nanosený kov kontaktu a nanoštruktúrou) zostať zvyšky rezistu neodstráneného pri kroku litografie zobrazenom na obrázku č.7 C. Pred nanosením kovovej vrstvy kontaktu je preto snaha o odstránenie týchto nežiadúcich vrstiev. V prípade vzoriek prezentovaných v tejto práci bola snaha o odstránenie nežiadúcich vrstiev z povrchu nanoštruktúry realizovaná aplikovaním kyslíkovej plazmy. Kyslíková plazma však môže následne vytvoriť na povrchu polovodičovej nanoštruktúry nežiaducu vrstvu oxidov, ktorú je následne vhodné odstrániť chemickým leptaním. Kvôli všetkým vyššie uvedeným dôvodom je príprava ohmického kontaktu zložitá na realizáciu.

Poslednou diskutovanou témou v tejto kapitole je spôsob privedenia kontaktov k jednorozmernej nanoštruktúre. Konkrétne budú diskutované dva spôsoby. Jeden spočíva v privedení kontaktov na konce nanoštruktúry tak, že sú jej pokračovaním – koncové kontakty (obrázok č.13 A), a druhý spôsob je privedenie kontaktu na steny nanoštruktúry – bočné kontakty (obrázok č.13 B). Koncové kontakty je možné u jednorozmerných nanoštruktúr vytvoriť v prípade, že tieto nanoštruktúry boli vytvorené z kovových častíc, alebo ich reakciou s kovmi^{[39][40]}. Bočné kontakty (ako najčastejší sa vyskytujúci prípad) je možné jednoducho vytvoriť nanosením kovovej vrstvy na povrch jednorozmernej nanoštruktúry. Rozdiely medzi uvedenými typmi kontaktov nespočívajú len v možnosti vytvorenia rôznych chemických väzieb medzi nanoštruktúrou a kontaktom^[35]. Obmedzené rozmery jednorozmerných nanoštruktúr prinášajú ďalšie komplikácie. Ohýbanie pásov z dôvodu spojenia kovu a polovodiča uvedené a vysvetlené vyššie (obrázok č.11) uvažuje dostatočne veľké rozmery oboch materiálov. V prípade jednorozmerných nanoštruktúr sú však rozmery obmedzené. Ohýbanie pásov sa deje v smere kolmom na rozhranie kov/polovodič. V prípade koncových kontaktov sa môže ohýbanie pásov (prenos náboja a ustálenie rovnováhy) realizovať pozdĺž

celej nanoštruktúry. Avšak u bočných kontaktov, sa ohýbanie pásov realizuje na vzdialenosť priemeru jednorozmernej nanoštruktúry (kolmo na rozhranie). Z tohto dôvodu, je výška potenciálovej bariéry u Schottkyho kontaktu závislá na priemere jednorozmernej nanoštruktúry. Extrémnym prípadom sú nanotrubice s jednou, alebo malým počtom monovrstiev^[41]. Ďalším faktorom ovplyvňujúcim prechod náboja cez rozhranie kov/polovodič u bočných kontaktov je dĺžka prechodu L_T . Je to efektívna dĺžka, na ktorej nosiče náboja prejdú z kovového kontaktu do polovodičovej nanoštruktúry (prípadne naopak)^[42]. Pre objemové materiály sa používa vzťah^[35]:

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_K}{R_\xi}}, \quad (1.16)$$

kde ρ_K je plošný merný odpor kontaktu (kovu) a R_ξ je odpor štruktúry pod týmto kontaktom. Dĺžka prechodu následne určuje odpor kontaktu nasledujúcim vzťahom^[35]:

$$R_K = \frac{\sqrt{\rho_K R_\xi} \coth \frac{L}{L_T}}{L_V}, \quad (1.17)$$

kde L je dĺžka kontaktu a L_V je šírka kontaktu. Otázkou ostáva, či je možné vzťah použiť všeobecne aj v prípade kontaktov na jednorozmerných nanoštruktúrach. Môžeme však predpokladať zvyšujúci sa odpor kontaktu, pri zmenšujúcich sa rozmeroch kontaktu. Vzťah 1.17 predpokladá výrazný nárast odporu kontaktu pri veľkostiach kontaktu menších než dĺžka prechodu L_T . Preto je pre bočné kontakty privedené na jednorozmerné nanoštruktúry žiaduce, aby nanoštruktúru prekryvali na čo najväčšej ploche.

1.4 Fotoluminiscencia

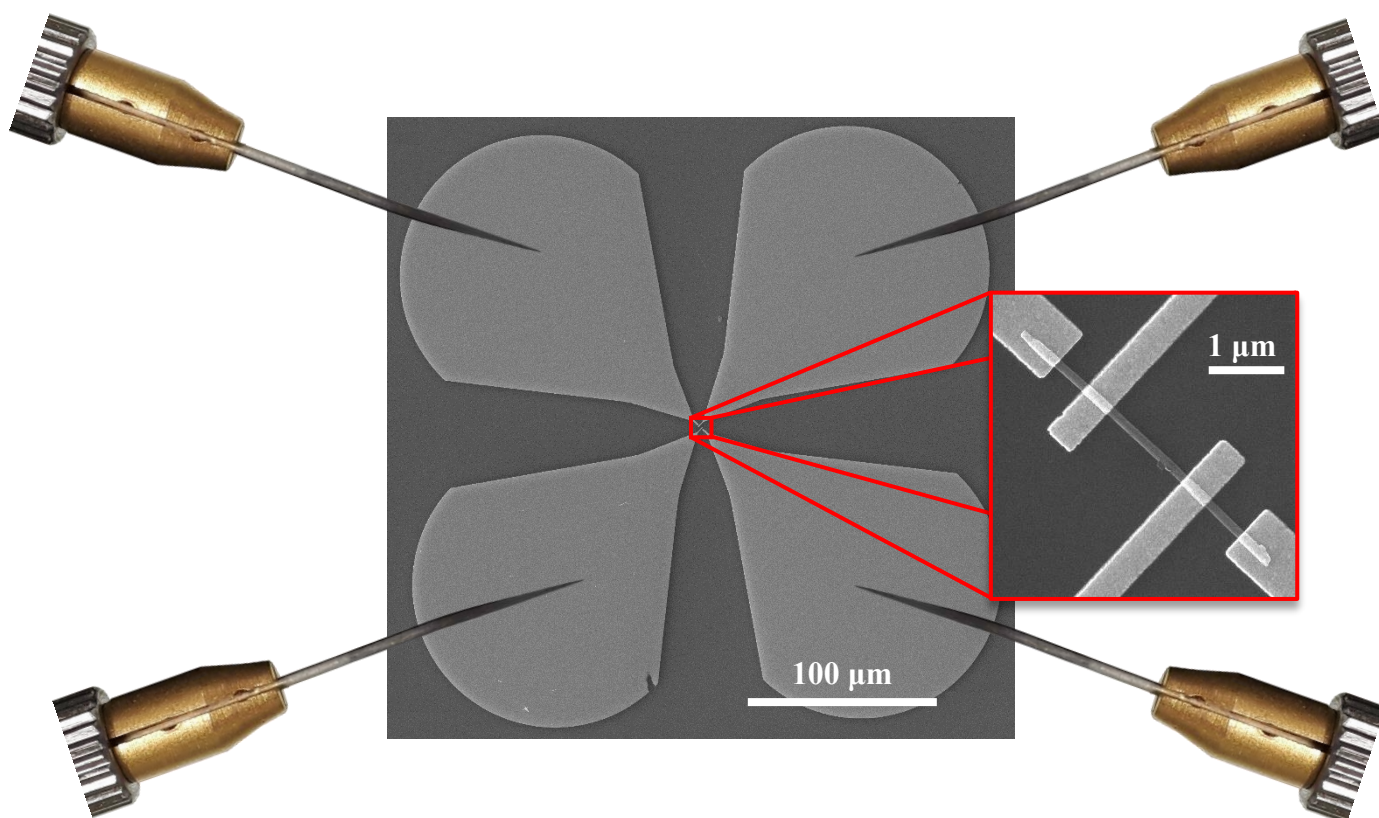
Transport nosičov náboja nanoštruktúrou a určenie veličín ako pohyblivosť nosičov náboja, merný odpor daného materiálu a koncentrácia nosičov náboja sú pre integráciu nanoštruktúr do funkčných celkov nevyhnutné. Praktická realizácia týchto meraní je však v prípade jednorozmerných nanoštruktúr často zložitá. Komplikácie sú spojené s privedením kontaktov potrebných pre merania. Meranie výrazne jednoduchšie na realizáciu, aj v prípade jednorozmerných nanoštruktúr, je meranie fotoluminiscencie. Meraním fotoluminiscencie je možné taktiež určiť dôležité charakteristiky polovodičov, ako napríklad šírka pásu zakázaných energií, odhad koncentrácie nosičov náboja a iné.

Meranie fotoluminiscencie je nedeštruktívna metóda využívajúca sa na meranie vlastností polovodičových materiálov ako aj v objemovej podobe (rozmerovo neobmedzené), tak aj v podobe nanoštruktúr^[43]. Fotoluminiscencia je optické žiarenie emitované fyzikálnym systémom vyplývajúce z excitácie systému do nerovnovážneho stavu pomocou ožiarenia systému^[44]. Po ožiarení systému najprv dochádza k vytvoreniu elektrón-dierového páru, následne dochádza k rekombinácii elektrón – dierového páru a k emisii svetla a posledným procesom je únik svetla zo vzorky. Vzhľadom na to, že žiarenie je pri generácii elektrón-dierového páru pohlcované, fotoluminiscencia prebieha primárne v blízkom okolí ožiarenej oblasti^[44]. U polovodičov sú elektróny zväčša emitované z valenčného pásu do vodivostného pásu. Pri následnej rekombinácii môže elektrón najprv prejsť viacerými procesmi (nežiarivé procesy), avšak posledným procesom je, v ideálnom prípade, žiarivá rekombinácia. Energia vyžiarených fotónov následne vypovedá o šírke pásu zakázaných energií polovodičovej štruktúry. V ideálnom prípade zmerané fotoluminiscenčné spektrum obsahuje jeden pík so stredom v hodnote energie fotónu odpovedajúcej šírke pásu zakázaných energií polovodičovej

štruktúry. Šírka píku následne závisí na čase, ktorý je potrebný na rekombináciu jednotlivých elektrón-dierových párov (teplotná závislosť). U reálnych štruktúr je však zmerané spektrum často zložitejšie. Zmerané fotoluminiscenčné spektrum ovplyvňujú viaceré faktory, ako defekty v polovodičových štruktúrach, nečistoty, teplota systému a iné. Tieto faktory môžu vyústiť v rozšírenie píkov, v zmenu tvaru píkov, v posunutie píkov dokonca aj v rozštiepenie píkov na viaceré. Na zmerané spektrum má taktiež vplyv dotovanie polovodičov^[45].

Dotovaním polovodičov je možné ovplyvňovať koncentráciu nosičov náboja. Táto zmena sa vo fotoluminiscenčnom spektre môže prejavovať objavením sa dodatočných píkov, rozšírením píkov alebo posunom píkov v porovnaní s nedotovanými polovodičmi^[46]. Ako už bolo spomenuté, pozícia píku a jeho šírka je daná intrinzickým pásom zakázaných energií a teplotou. Pridaním malého počtu prímiesí sa v polovodiči zvýši počet nosičov náboja, čo má za následok rozšírenie prímesovej energiovej hladiny^[48]. Pozícia píku sa preto posúva smerom k nižším energiám, keďže rekombinácia prebieha primárne cez prímesovú energiovú hladinu. Ďalšie zvyšovanie koncentrácie prímiesí spôsobí ďalší posuv píku smerom k nižším energiám, dôjde k zužovaniu pásu zakázaných energií^{[47][48]} a k ďalšiemu rozšíreniu píku. Ďalším zvýšením koncentrácie prímiesí sa hodnota chemického potenciálu dostane nad hodnotu dna vodivostného pásu a poloha píku sa začne posúvať smerom k vyšším energiám (Bursteinov-Mossov efekt). Týmto spôsobom odráža poloha, tvar a šírka píku koncentráciu prímiesí v polovodiči. Podstatným faktorom pre posuv a šírku píku je taktiež teplota systému pri meraní. Metódy určenia koncentrácie nosičov náboja vyplývajúce z určenia polohy píku a z jeho šírky sú zväčša využívané pri nižších hodnotách koncentrácií prímiesí, kde spektrum obsahuje jeden pík^{[46][48][49]}. Pri vyšších hodnotách koncentrácií prímiesí je výhodné využiť vysoko-energetickú časť píku (píku, ktorý leží na najvyššej energii v prípade viacerých píkov), ktorá je spojená s vysokoenergetickou časťou hustoty obsadených stavov. S pomocou numerického fitovania je možné zo spektra získať teplotu a hodnotu chemického potenciálu. Následne je pomocou numerického riešenia Fermi-Dirackovho integrálu možné nájsť koncentráciu nosičov náboja. Pri riešení je nutné vziať do úvahy viaceré premenné, ako napríklad zmenu efektívnej hmotnosti a zmenu veľkosti pásu zakázaných energií v závislosti na koncentrácii prímiesí^{[46][48]}. Pri nižších koncentráciách prímiesí, kedy hodnota chemického potenciálu leží pod hodnotou dna vodivostného pásu, je prístup s fitovaním spektra nepoužiteľný.

Prístup určenia koncentrácie nosičov náboja pomocou meraní fotoluminiscencie je síce jednoduchý na prípravu experimentu a meranie samotné, avšak kvantifikácia koncentrácie nosičov náboja vyžaduje využitie mnohých zjednodušujúcich modelov, numerického fitovania a numerického riešenia^{[46][48]}. Po optimalizácii celého procesu je však možné dosiahnuť uspokojivú zhodu určenia koncentrácie nosičov náboja pomocou meraní fotoluminiscencie a pomocou iného druhu merania (napríklad pomocou merania s využitím Hallovoho javu). Praktickej realizácii meraní sa venuje sekcia 2.2 a sekcia 3.

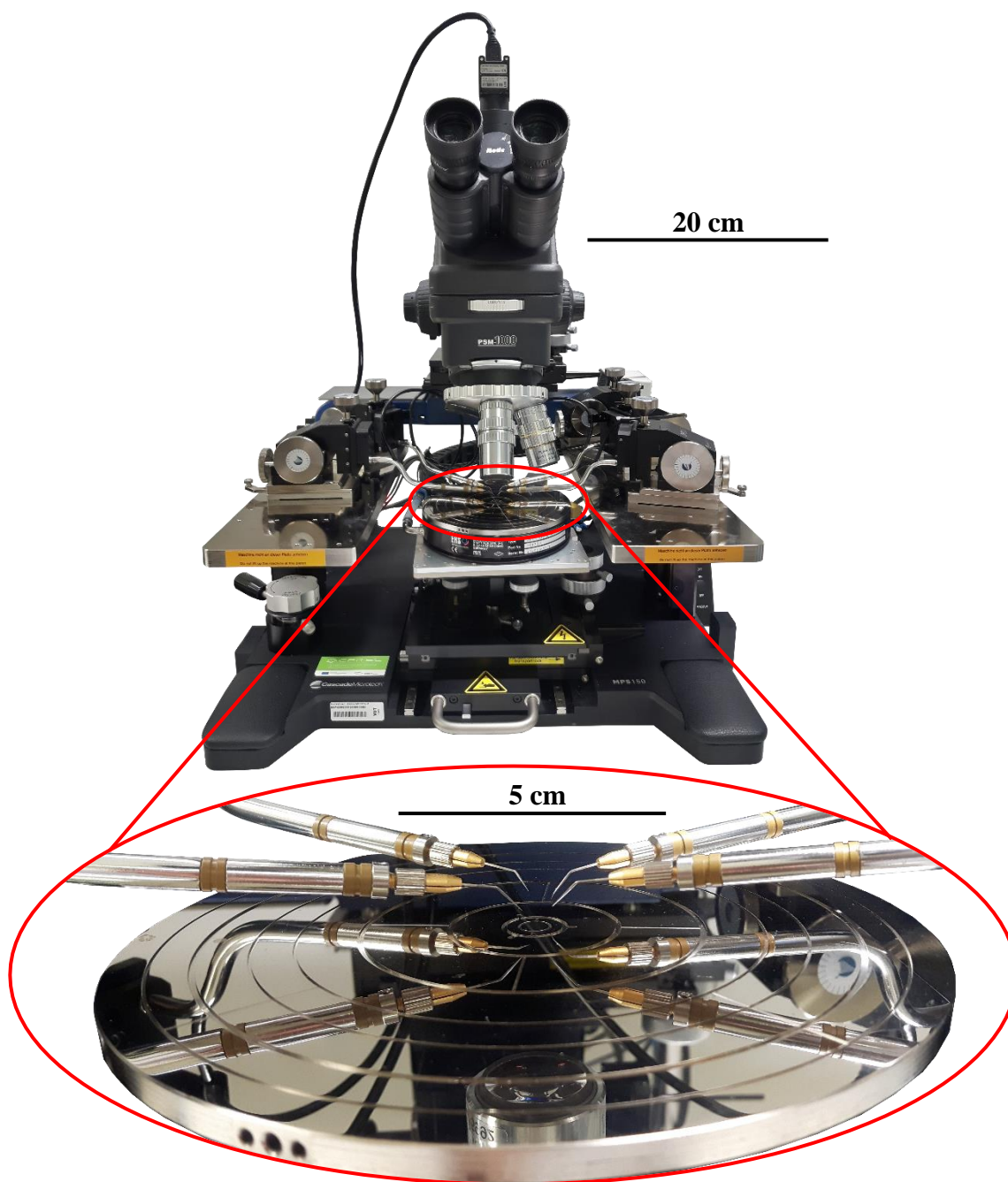


Obrázok č.14: Schematické zobrazenie nakontaktovanej nanoštruktúry spolu s elektródami uľahčujúcimi pripojenie k meracím prístrojom. Obrázok zobrazuje nakontaktovanú WS_2 nanotrubicu pre meranie štvorbodovou metódou. K elektródam sú privedené hroty mikromanipulátorov. Hroty mikromanipulátorov sú voči mierke uvedenej na obrázku približne 30 krát zmenšené, aby bolo možné ich na obrázku zobraziť. Celé mikromanipulátory sú uvedené na obrázku č.15.

2 Realizácia meraní

2.1 Elektrické transportné vlastnosti

Pri litografickom vytváraní kontaktov (obrázok č.7) sú na ich koncoch vytvorené rádovo stovky mikrometrov veľké elektródy (obrázok č.14), ktoré uľahčujú spojenie vytvorených kontaktov s meracími prístrojmi. Pri práci boli využité dva prístupy pripojenia týchto kontaktov s elektródami k meracím prístrojom. Elektródy sú stále primálne pre pripojenie ku konvenčným meracím prístrojom. Navyše pokus o pripojenie môže tieto litograficky vytvorené elektródy s výškou rádovo 100 nm ľahko porušiť. Tieto elektródy sú však dosť veľké na to, aby boli pripojené k robustnejším elektródam (ktoré už pripojenie meracích prístrojov nepoškodí) jednoduchším a rýchlejšim spôsobom ako je proces litografie. Prístroj nazývaný wire bonder obsahuje hrot s tenkým kovovým drôtom, ktorým je možné spojiť elektródy s nakontaktovanými nanoštruktúrami a robustnejšie elektródy jednoducho pripojiteľné ku konvenčným meracím prístrojom. Pri meraniach prezentovaných ďalej bol však využitý iný prístup pripojenia. Použitý prístup využíva mikromanipulátory, ktoré majú na jednom konci



Obrázok č.15: Zobrazenie sústavy s mikromanipulátormi. Sústava obsahuje štyri mikromanipulátory s ramenom, ktoré je zakončené tenkým hrotom. Štyri hroty sú pri meraní pritlačené na elektródy nakontaktovaných jednorozmerných nanoštruktúr (obrázok č.14). Substrát s nakontaktovanými nanoštruktúrami je položený na plošinu zobrazenú vo výreze. Na plošinu je možné priviesť napätie – medzi plošinou a spodnou časťou substrátu (hradlovou elektródou) je teda vodivé spojenie, a týmto spôsobom je na hradlovú elektródu možné priviesť napätie.

kovový hrot (obrázky č.14 a č.15), a druhý koniec obsahuje BNC kábel, ktorý je možné priamo pripojiť k meracím prístrojom (použitý prístroj: 4-probe station Cascade Microtech MPS 150 – obrázok č.15). Pri meraní sú pomocou mikroskopu nájdené elektródy kontaktov, nad ktoré sú umiestnené hroty mikromanipulátorov (obrázok č.14). Následne sú hroty mikromanipulátorov pritlačené k elektródam. Je nutné zvoliť vhodnú pritlačnú silu tak, aby

došlo k vodivému spojeniu mikromanipulátoru a elektródy, ale aby zároveň nedošlo k mechanickému prerazeniu dielektrickej vrstvy oddeľujúcu spodnú hradlovú elektródu a vytvorené kontakty (sekcia 1.2). Pri prezentovaných meraniach bola prítlačná sila ovládaná manuálne, preto pri realizácii opakovaných meraní pravdepodobne nebola použitá rovnaká prítlačná sila a spojenie preto nebolo pri opakovaných meraniach úplne rovnaké.

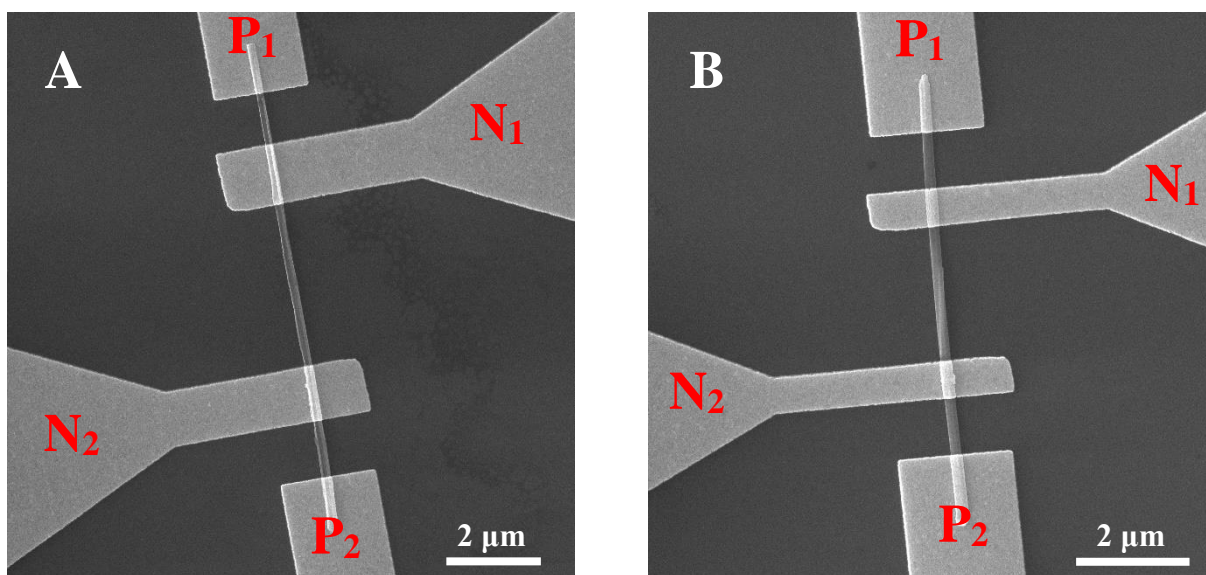
Mikromanipulátory sú pomocou BNC káblov pripojené ku komplexnému meraciemu prístroju obsahujúcemu viacero zdrojov napätia a meracích prístrojov (použitý prístroj: Keithley 4200-SCS Parameter Analyzer). Počas jedného merania je možné využiť kombináciu viacerých z nich, pre dosiahnutie čo najväčšej presnosti pri danej hodnote napätia a prúdu. Napríklad pre privedenie napätia rádovo desiatky mV bude využitý napäťový zdroj s rozmedzím 0 V až 200 mV s presnosťou 5 μ V. Pre vyššie privedené napätia bude automaticky pripojený napäťový zdroj s väčším rozmedzím, avšak za cenu horšej presnosti. Rovnaký postup platí ako aj pre zdroje napätia a prúdu, tak aj pre ampérmetre a voltmetre. Automatické prepájanie zdrojov a meracích prístrojov ponúka najvyššiu dosiahnuteľnú presnosť v danom rozmedzí, ale zároveň môže byť toto prepnutie pozorovateľné v nameranej závislosti v podobe nechcených ostrých pík (ak dôjde k prepnutiu zdrojov práve vo chvíli merania, tak nameraná hodnota nemusí odpovedať nastavenej z dôvodu vypínania jedného zdroja a zapínania druhého).

Cieľom meraní bolo určenie volt-ampérových charakteristík jednorozmerných nanoštruktúr. To znamená zmeranie prúdu pri jednej hodnote privedeného napätia, následnú zmenu privedeného napätia a opätovné zmeranie prúdu pre hodnoty napätia v požadovanom rozmedzí. Pre presné merania, je preto dôležité správne nastavenie času medzi zmenou napätia a samotným zmeraním, aby sa hodnota napätia ustálila na požadovanej hodnote. Pri zmene napätia z jednej hodnoty na druhú sa táto zmena nedeje skokovo. Meracia sústava (prístroj so všetkými časťami, BNC káble, mikromanipulátory, litografické kontakty a štruktúra samotná) môže byť reprezentovaná odporom a kapacitou, takže sa jedná o RC obvod s časovou konštantou určujúcou ustálenie požadovanej hodnoty. Pri päťnásobku časovej konštanty je možné dosiahnuť menej než jednopercentný rozdiel od požadovanej hodnoty. Nižšia kapacita a nižší odpor znamenajú kratší čas na ustálenie. Čas potrebný na ustálenie je možné skrátiť napríklad použitím káblov s nižšou kapacitou (triaxové káble).

Prístroj samotný je pripojený k bežnému elektrickému vedeniu so striedavým napätím (prúdom) o frekvencii 50 Hz. Po konverzii tohto striedavého napätia prístrojom na jednosmerné napätie, ostáva v charakteristike tohto jednosmerného napätia šum s frekvenciou pôvodného striedavého napätia. Vplyv tohto šumu na meranie je možné odstrániť meraním hodnoty prúdu počas jedného alebo viacerých cyklov (pre 50 Hz trvá jeden cyklus 20 ms). Pre odstránenie iných zdrojov šumu bolo taktiež využité priemerovanie viacerých meraní.

Priemerovanie je realizované softvérom meracieho prístroja a výsledkom je len priemerná hodnota bez neistoty merania typu A. Preto neistota uvedená v prezentovaných výsledkoch vyplýva len z neistoty typu B – z neistoty meracích prístrojov a zdrojov. Pre meranie polovodičových nanoštruktúr je nutné nájsť kompromis medzi mechanizmami odstránenia šumu (a ustálenia hodnôt) a medzi dĺžkou merania. Počas celej doby merania je na nanoštruktúru totižto privádzané napätie, čo spôsobuje zahrievanie nanoštruktúry. Odpor polovodičov sa so zvyšujúcou sa teplotou znižuje, a týmto spôsobom môže príliš dlhý čas merania (lepšie pre odstránenie šumu) ovplyvniť výsledky merania. Príliš krátky čas merania je však spojený s vyššie uvedenými problémami.

Optimalizácia parametrov merania bola realizovaná na nakontaktovaných WS₂ nanotrubiciach. Bolo pripravených dvanásť WS₂ nanotrubíc nakontaktovaných štyrmi kontaktmi. Boli realizované jednak dvojbodové merania (k napäťovým kontaktom nebolo nič pripojené), a taktiež štvorbodové merania. V niektorých prípadoch bolo napätie merané zároveň aj na prúdových, aj na napäťových kontaktoch pre odhad rozdielu medzi dvojbodovou

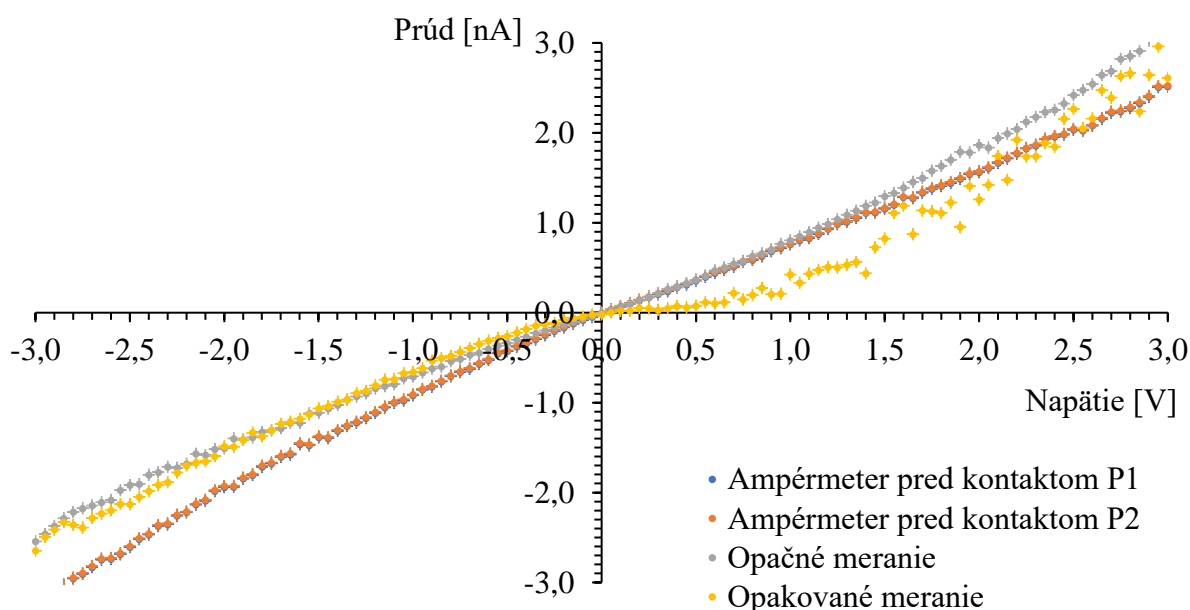


Obrázok č.16: WS₂ nanotrubic, na ktorých boli realizované merania. Obrázok **A** zobrazuje WS₂ nanotrubicu označenú číslom 1 a obrázok **B** zobrazuje WS₂ nanotrubicu označenú číslom 2. P₁ a P₂ označujú prúdové kontakty 1 a 2 a N₁ a N₂ označujú napäťové kontakty 1 a 2 (obrázok č.1).

a štvorbodovou metódou merania. V ideálnom prípade, by všetky charakteristiky vykazovali lineárny nárast prúdu pri rastúcom napätí, kde sklon priamky závisí na odpore. U niektorých zmeraných nanotrubíc bol však priebeh výrazne nelineárny alebo bol zmeraný prúd príliš malý, čo bolo pravdepodobne dôsledkom zlého spojenia medzi kontaktom a nanoštruktúrou (diskutované v sekcii 1.3). V tejto práci budú prezentované výsledky z dvoch najlepších meraní (obrázok č.16). Kontakty u všetkých nakontaktovaných WS₂ nanotrubíc sú tvorené vrstvou približne 5 nm Ti a 95 nm Au. Výška kontaktov nebola meraná, pretože jej absolútne presná hodnota nie je úplne podstatná. Prvým krokom bolo overiť správnosť merania (graf na obrázku č.17).

Pre overenie správnosti boli využité dvojbodové merania na nanotrubicu č.1 (obrázok č.16). Kontakty N₁ a N₂ neboli pri meraní k ničomu pripojené. Prvé (modré body v grafe) a druhé (oranžové body v grafe) merania prebiehali tak, že na kontakte P₂ bola nastavená stabilná hodnota 0 V (uzemnenie) a napätie na kontakte P₁ bolo menené postupne z hodnoty – 3 V po hodnotu + 3 V s krokom 0,05 V. Prúd bol v prípade prvého merania meraný pred kontaktom P₁ a v druhom prípade pred kontaktom P₂. Zo zákona zachovania náboja sa tieto hodnoty musia rovnať. V prípade, že náboj preniká do dielektrickej vrstvy alebo až do hradlovej elektródy kde následne ostáva uväznený, tak tieto dve hodnoty sa rovnať nemusia. Z grafu je zrejmé, že v tomto prípade k uvedenému problému nedochádza (meranie nevylučuje prechod prúdu dielektrickou vrstvou alebo hradlovou elektródou bez uväznenia nosičov náboja). Ďalším krokom bolo overenie toho, že výsledky merania sa nemenia pri zmene kontaktu, na ktorom sa mení napätie, a na ktorom je napätie nastavené konštantne 0 V. Výsledky tohto merania (kedy sa napätie mení rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že napätie je menené na kontakte P₂) reprezentujú šedé body v grafe. Od predchádzajúceho merania sú viditeľné mierne odchýlky. Môže to byť napríklad spôsobené miernou zmenou (porušením) nanotrubic počas prvého merania. Posledným krokom bolo overenie opakovateľnosti meraní. Meranie prebiehalo iný deň, takže došlo k oddialeniu mikromanipulátorov a opätovnému pritlačeniu k elektródam. Taktiež došlo k zmene prístupu privádzania napätia. Pri štvrtom meraní (žlté body v grafe) bolo napätie znova menené na

Meranie dvojbodovou metódou pre overenie správnosti merania

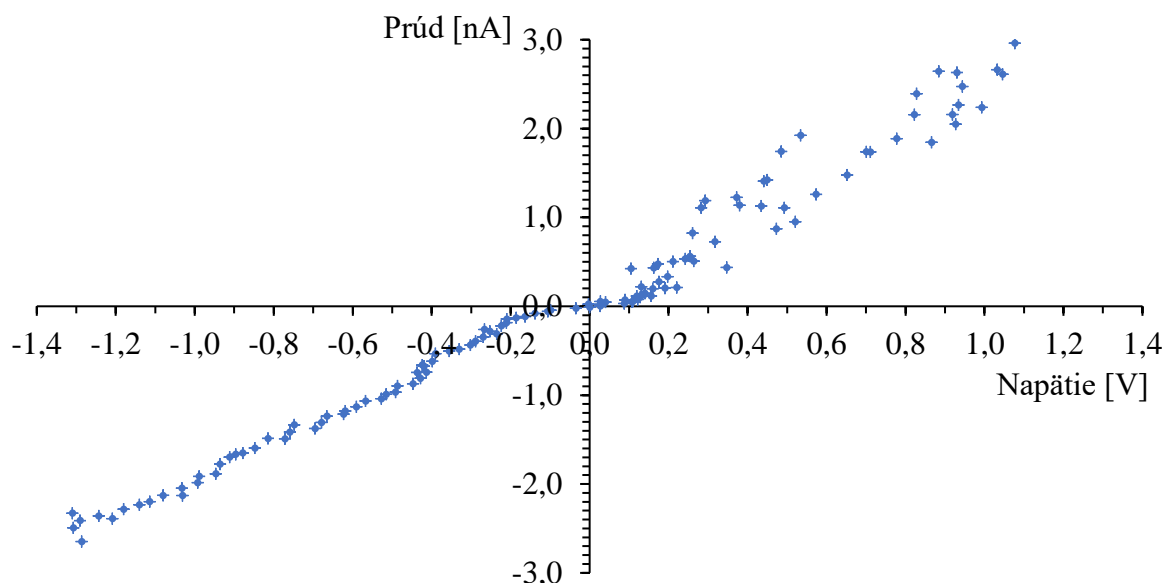


Obrázok č.17: Výsledky meraní volt-ampérovej charakteristiky WS₂ nanotrubičky a overenie správnosti meraní. Výsledky meraní na WS₂ nanotrubičky č.1 (obrázok č.16). Pri meraní bola využitá dvojbodová metóda merania (kontakty N₁ a N₂ neboli pripojené). Pri prvom meraní (modré body – zle viditeľné kvôli spĺývaniu s oranžovými) bolo napätie menené na kontakte P₁ a na kontakte P₂ bola nastavená hodnota 0 V. Prúd bol meraný ampérmetrom umiestneným pred kontaktom P₁. U druhého merania (oranžové body) bol prúd meraný pred kontaktom P₂. Prvé a druhé meranie prebiehalo súčasne. Tretie meranie (šedé body) prebiehalo tak, že napätie bolo menené na kontakte P₂ a na kontakte P₁ bola nastavená hodnota 0 V. Štvrté meranie (žlté body) prebiehalo iný deň (oddialenie mikromanipulátorov a opätovné pritlačenie – obrázok č.15) pre overenie opakovateľnosti meraní. V tomto prípade bolo napätie opäť menené na kontakte P₂, avšak najprv bolo menené od hodnoty 0 V do hodnoty + 3 V a následne od hodnoty 0 V do hodnoty – 3 V. Chybové úsečky (vyplývajúce iba z neistoty typu B) sú tak malé, že pravá a ľavá (respektíve horná a dolná) úsečka spĺývajú a opticky je na grafe viditeľná ako jedna – chybové úsečky spoločne tvoria kríž, ktorý je viditeľný na grafe.

kontakte P₂ ako v predchádzajúcom prípade, avšak najprv bolo menené v rozmedzí 0 V až + 3V a pri následnom meraní v rozmedzí 0 V až – 3V. Už pri prvom pohľade sa meranie pri kladných hodnotách napätia líši od predchádzajúceho. Je viac zašumené a má trochu pomalší nárast. To je však pravdepodobne spôsobené tým, že meranie bolo realizované bezprostredne po zapnutí prístroja. Prístroj pred meraním vyžaduje nejaký čas, aby sa všetky komponenty zahriali na pracovnú teplotu, a tým bolo meranie čo najpresnejšie. Následné meranie pre záporné napätia už celkom dobre odpovedá predchádzajúcemu meraniu. Preto je možné usúdiť, že merania sú opakovateľné. Ako už bolo diskutované v predchádzajúcom texte, v grafe sú uvedené len neistoty typu B, ktoré sú však minimálne, a v grafe len ťažko pozorovateľné.

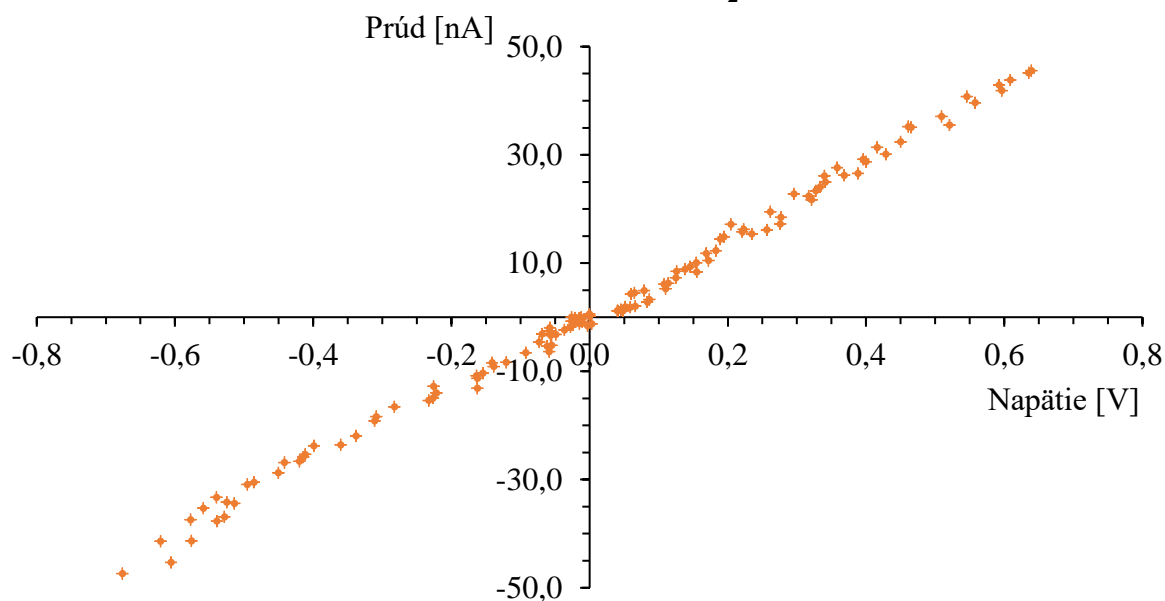
Ďalej budú prezentované merania štvorbodovou metódou. Merania vykazujú nenulový prúd pri nulovom napätí. S najväčšou pravdepodobnosťou to je spôsobené prístrojom samotným (tzv. ofset prístroja). Môže byť spôsobený prúdmi prechádzajúcimi cez dielektrické (izolačné) vrstvy v prístroji samotnom. Výsledky ďalej prezentované sú upravené s prihliadnutím na tento ofset (posunuté tak, aby pri nulovom napätí prechádzal nanoštruktúrou nulový prúd). Výsledky meraní sú uvedené na obrázkoch č.18 a č.19.

Meranie štvorbodovou metódou - WS₂ nanotrubicica č.1

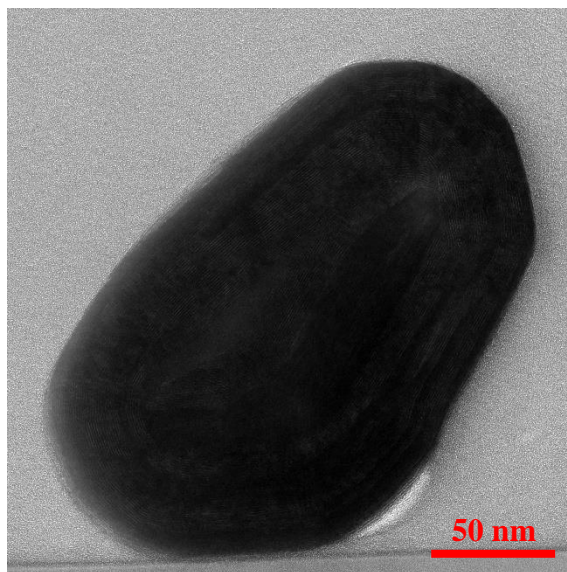
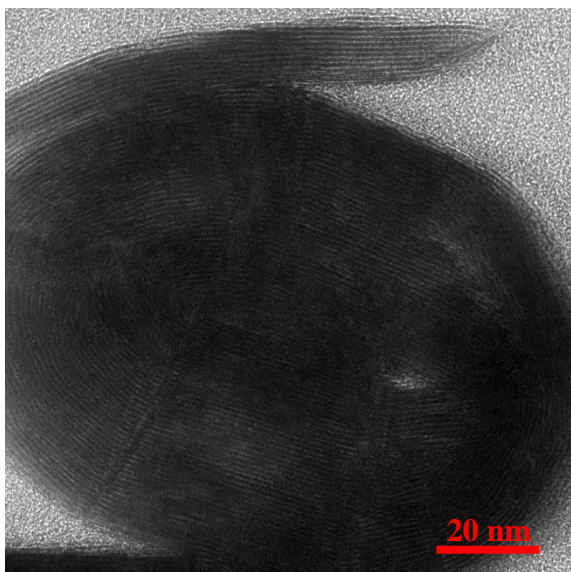


Obrázok č.18: Výsledky merania volt-ampérovej charakteristiky WS₂ nanotrubicice č.1 zmerané pomocou štvorbodovej metódy merania. Pri meraní bol použitý napäťový zdroj, kedy napätie bolo menené na kontakte P₂ najprv v rozsahu 0 V až + 3 V a následne 0 V až – 3 V. To spôsobilo prechod prúdu, ktorý bol meraný, a zároveň bolo merané napätie medzi kontaktmi N₁ a N₂. Hodnoty tohto zmeraného napätia a zmeraného prúdu sú zobrazené na grafe. Chybové úsečky boli určené rovnako, ako v predchádzajúcich prípadoch.

Meranie štvorbodovou metódou - WS₂ nanotrubicica č.2

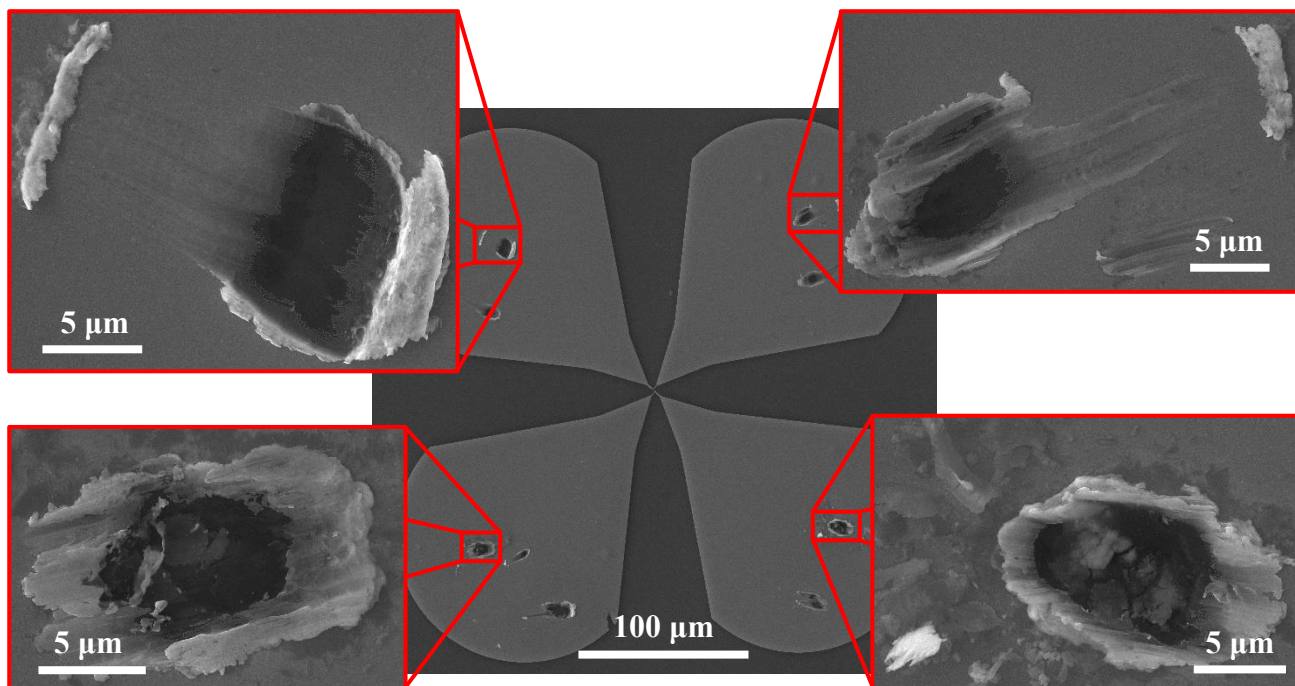


Obrázok č.19: Výsledky merania volt-ampérovej charakteristiky WS₂ nanotrubicice č.2 zmerané pomocou štvorbodovej metódy merania. Pri meraní bol použitý napäťový zdroj, kedy napätie bolo menené na kontakte P₂ najprv v rozsahu 0 V až + 3 V a následne 0 V až – 3 V. To spôsobilo prechod prúdu, ktorý bol meraný, a zároveň bolo merané napätie medzi kontaktmi N₁ a N₂. Hodnoty tohto zmeraného napätia a zmeraného prúdu sú zobrazené na grafe. Chybové úsečky boli určené rovnako, ako v predchádzajúcich prípadoch.



Obrázok č.20: Príklad prierezu WS₂ nanotrubic z rovnakej výrobnéj série ako nanotrube č.1 a č.2 zobrazené transmisným elektrónovým mikroskopom. Oválne tvary prierezov mohli byť spôsobené procesom, ktorý predchádzal samotnému pozorovaniu na transmisnom elektrónovom mikroskope, avšak môže to znamenať, že merané nanotrube nemajú kruhový tvar. Obrázky nanotrubic, na ktorých prebiehalo meranie, sú z pohľadu zhora, a preto nie je možné určiť, či majú kruhový tvar. Uvedené obrázky z transmisného elektrónového mikroskopu boli vytvorené Bc. Kristýnou Bukvišovou (Vysoké učení technické v Brně) a sú v tejto práci prezentované s jej dovoľením.

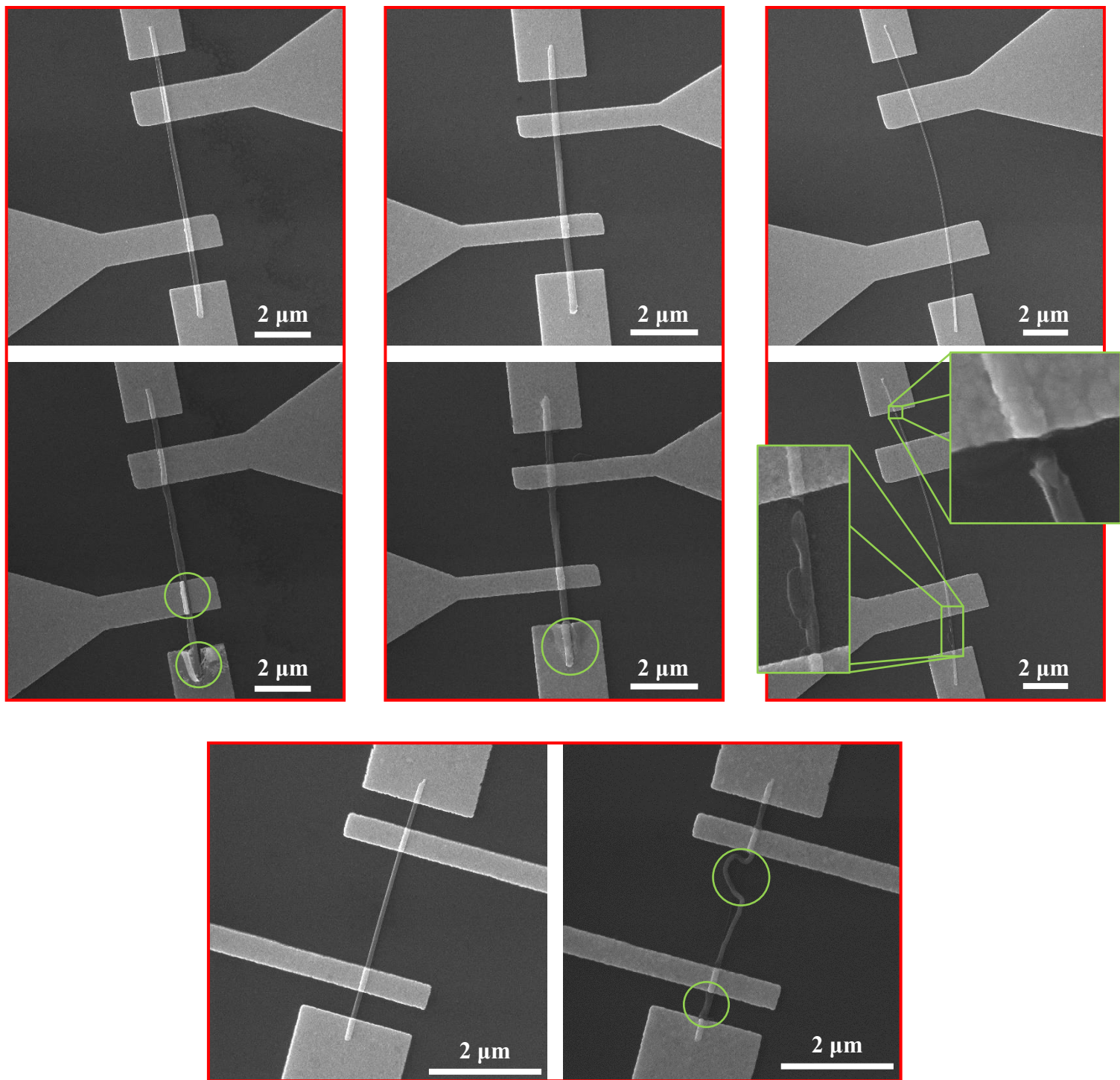
Z grafov je zrejmé, že WS₂ nanotrube č.1 má vyšší odpor než WS₂ nanotrube č.2 (približne desaťnásobne menší prechádzajúci prúd pri rovnakom napätí na nanotrube). Odpor nanotrubic bol určený lineárnou regresiou. Pri platnosti Ohmovho zákona sa odpor rovná smernici priamky závislosti napätia na prúde (opačná závislosť než je zobrazená v grafoch). Nájdené hodnoty odporov jednotlivých nanotrubic sú nasledujúce $R_1 = (472 \pm 6) \text{ M}\Omega$ pre WS₂ nanotrube č.1 a $R_2 = (14,50 \pm 0,10) \text{ M}\Omega$ pre WS₂ nanotrube č.2. Neistoty vyplývajú s lineárnej regresie realizovanej metódou najmenších štvorcov. Pre porovnanie týchto hodnôt medzi sebou a medzi inými meraniami bola spočítaná hodnota merného odporu WS₂. Pre výpočet bol použitý vzťah (1.1). Tento vzťah však platí len v prípade uniformného elektrického poľa naprieč celou nanotrubicou, a taktiež predpokladá konštantnú plochu prierezu nanotrubic. Preto sú vypočítané hodnoty merného odporu WS₂ len orientačné. Priemer nanotrubic a ich dĺžka boli určené pomocou snímok z rastrovacieho elektrónového mikroskopu. Merania boli opakované desaťkrát (na rôznych miestach) a bola vyhodnotená rozšírená neistota typu A s intervalom spoľahlivosti 95%. Výsledná neistota bola určená ako kombinovaná neistota neistôt typu A a B, kde za neistotu typu B bol považovaný dvojnásobok veľkosti pixelu, ktorý odráža schopnosť presne určiť hranu nanotrubic zo snímky z rastrovacieho elektrónového mikroskopu. Nájdené hodnoty pre WS₂ nanotrube č.1 sú $d_1 = (160 \pm 20) \text{ nm}$ pre priemer a $l_1 = (3,46 \pm 0,04) \mu\text{m}$ pre dĺžku. Pre WS₂ nanotrube č.2 sú nájdené hodnoty $d_2 = (180 \pm 20) \text{ nm}$ pre priemer a $l_2 = (2,37 \pm 0,04) \mu\text{m}$ pre dĺžku. Priemer nanotrubic nie je konštantný pozdĺž daných nanotrubic. Meranie prebiehalo v oblasti stredu nanotrubic. Dĺžka pri meraniach štvorbodovou metódou odpovedá vzdialenosti napáťových kontaktov N₁ a N₂. Potrebná plocha prierezu bola následne určená ako plocha kruhu so zisteným priemerom. Nájdená hodnota merného odporu vypočítaná z parametrov prvej študovanej nanotrubic je $\rho_1 = (2,7 \pm 0,7) \Omega\text{m}$ a hodnota vypočítaná z parametrov druhej študovanej



Obrázok č.21: Typické poškodenie elektród po meraní – po pritlačení hrotov mikromanipulátorov. Snímka z rastrovacieho elektrónového mikroskopu zobrazuje nakontaktovanú nanoštruktúru (pred meraním zobrazenú na obrázku č.14) po meraní. Z uvedených snímok je zrejmé, že hroty mikromanipulátorov preniknú cez vrstvu tvoriacu kontakty (približne 100 nm) minimálne až na dielektrickú vrstvu. Taktiež je zrejmé, že každý mikromanipulátor je k elektróde pritlačený mierne iným spôsobom (iná zanechaná stopa), čo môže mať za následok iné spojenie a môže sa to odraziť v nameraných výsledkoch.

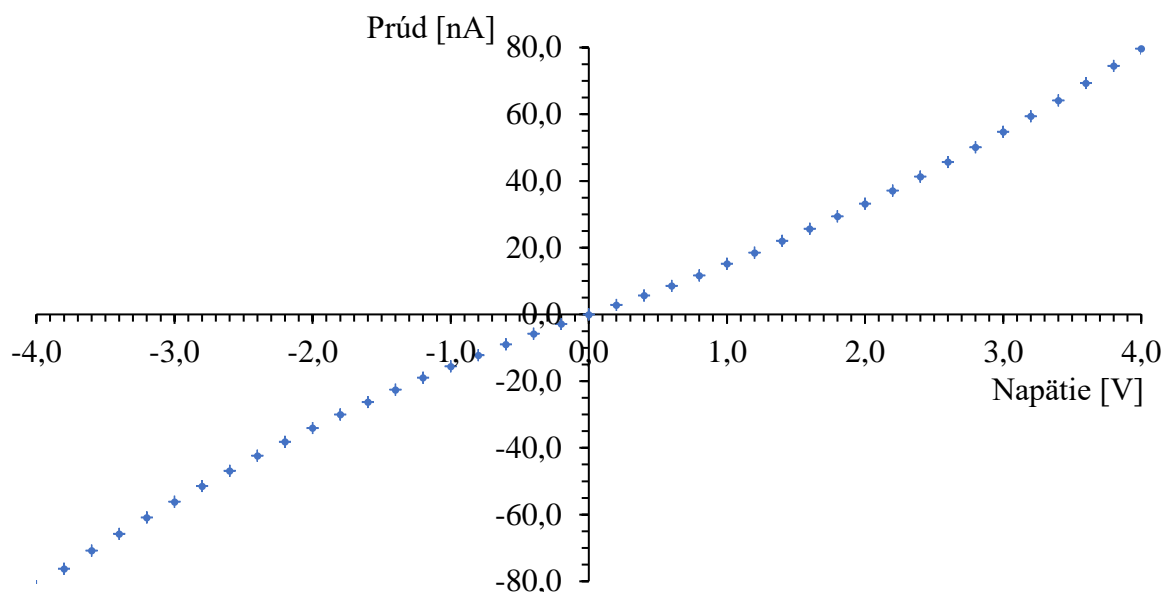
nanotubice j $\rho_2 = (0,16 \pm 0,03) \Omega\text{m}$. To, že sa hodnoty líšia medzi sebou môže naznačovať, že študované nanotrubice majú rôzny počet vrstiev, a tým pádom iný obsah prierezu. Skúmané nanotrubice boli vytvorené spoluprácou výskumných skupín Ally Zaka z Technologického Inštitútu v Holon a Reshefa Tenneho z Weizmannovho Inštitútu v Izraeli. Taktiež realizovali merania elektrických transportných vlastností, avšak vo vákuu. V tejto práci uvedené merania boli realizované na vzduchu, a hodnoty merného odporu sú približne o tri rády vyššie, než merania štvorbodovou metódou s bočnými kontaktmi uvedené v ich práci^[19]. Merania v ich práci naznačujú znižujúcu sa hodnotu merného odporu so znižujúcim sa počtom vrstiev nanotrubice. Tento jav môže byť zodpovedný za rôzne hodnoty uvedené v tejto práci. Tento prístup naznačuje, že nanotrubica č.2, môže mať menší počet vrstiev, než nanotrubica č.1. O vnútornej štruktúre daných nanotrubíc však nevieme nič usúdiť. To, koľko vrstiev daná nanotrubica obsahuje a aká je teda plocha prierezu nebolo zistené. Príklady prierezov nanotrubíc z rovnakej výrobnéj série sú zobrazené na obrázok č.20. Obrázky vytvorené Bc. Kristýnou Bukvišovou naznačujú, že nanotrubice nemusia mať kruhový tvar (obrázok č.20). Vzťah použitý pre výpočet merného odporu taktiež uvažuje uniformné elektrické pole pozdĺž nanotrubíc. Tento predpoklad je taktiež veľkým zjednodušením reálnej situácie, obzvlášť pre prípad bočných kontaktov.

WS₂ nanotrubice boli následne (podľa predpokladaných limitov nanotrubíc z práce Leviho a ostatných^[19]) premerané v rozmedzí -6 V až $+6\text{ V}$. Posledným meraním boli merania s pripojenou hradlovou elektródou. Pri meraniach v tejto práci s pripojenou hradlovou elektródou však už nebol zmeraný žiadny prúd, ani u nanotrubíc, z ktorých meraní sú v tejto práci uvedené výsledky. Je pravdepodobné, že nanotrubice boli vplyvom vysokých hodnôt



Obrázok č.22: Vizuálne porovnanie nakontaktovaných nanotrúbíc pred a po meraní. Červeným rámom sú orámované jednotlivé dvojice obrázkov danej WS₂ nanotrúbice pred a po meraní. Zľava zhora sa jedná o nanotrúbice č.1, č.2 a č.3. Pod nimi je zobrazená nanotrúbica č.4. V zelených rámoch sú vyznačené typické poškodenia – oddelenie kontaktov od nanotrúbice, deformácie nanotrúbice samotnej a prepálenie nanotrúbice.

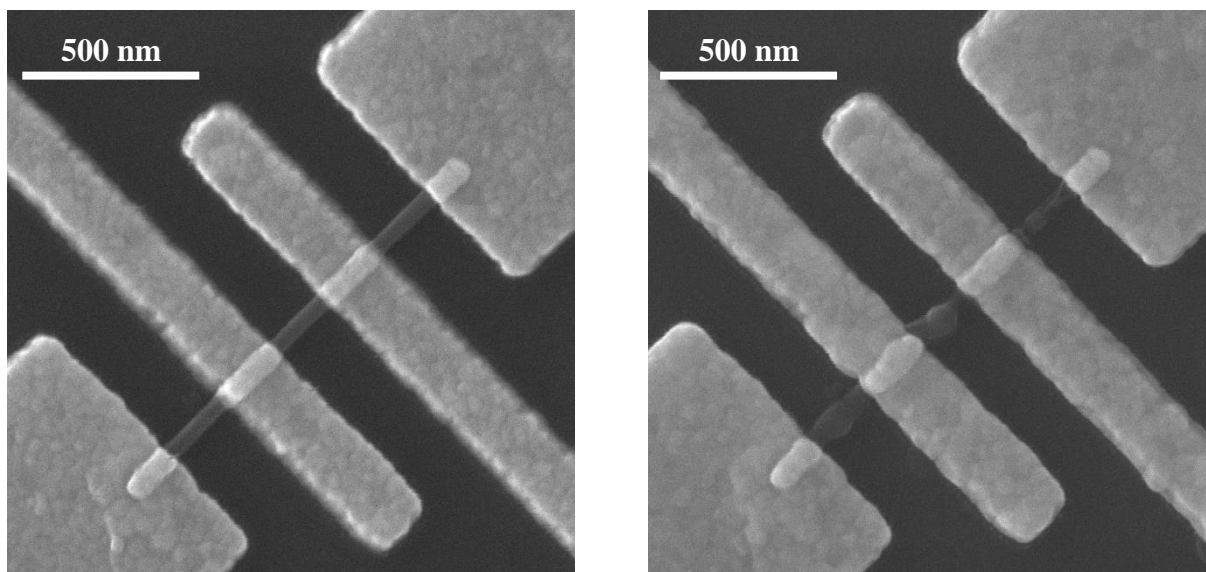
Meranie dvojbodovou metódou - InAs nanodrôť č.1



Obrázok č.23: Výsledky merania volt-ampérovej charakteristiky InAs nanodrôtu č.1 zmerané pomocou dvojbodovej metódy. Kontakty zobrazené na obrázku č.10 B boli upravené pomocou gáliového fokusovaného iónového zväzku. Chybové úsečky boli určené rovnako, ako v predchádzajúcich prípadoch. Merania boli realizované za pomoci výskumnej skupiny Aloisa Lugsteina z Technickej Univerzity vo Viedni (Inštitút elektroniky pevných látok).

prechádzajúceho prúdu zničené (pravdepodobne u predposlednej série meraní s privádzaným napätím v rozmedzí -6 V až $+6\text{ V}$). Porovnanie niektorých nakontaktovaných nanotrubic pred a po meraniach zobrazených rastrovacím elektrónovým mikroskopom sú uvedené na obrázku č.22. Najčastejším poškodením bolo oddelenie kontaktov od nanotrubic, pravdepodobne v dôsledku ich zahriatia (čas potrebný na zmeranie charakteristiky, sa za účelom zredukovať šum predĺžil na približne 10 minút pre 121 zmeraných hodnôt – nanotrubice boli zahrievané dlhú dobu). Taktiež je možné vidieť zúženia a rozšírenia nanotrubic, čo naznačuje zmenu štruktúry nanotrubice samotnej. Ďalej je uvedený prípad prerušenia kontaktu. Posledný obrázok zobrazuje najradikálnejšiu pozorovanú zmenu nanotrubice vplyvom meraní. Pri meraní sú taktiež poškodené elektródy, ku ktorým sú pritlačené hroty mikromanipulátorov (obrázok č.21).

Ďalšími nakontaktovanými a zmeranými nanoštruktúrami boli nanodrôty InAs. Pre ich nakontaktovanie bola využitá rovnaká vrstva kovov, ako v prípade WS_2 nanotrubic. Taktiež merania prebiehali z rovnakými nastaveniami meracieho prístroja. Pri meraniach bol však vo väčšine prípadov meraný len šum. Overenie, že sa jedná o šum prebehlo tak, že mikromanipulátory boli pripojené k meraciemu prístroju, ale hroty mikromanipulátorov neboli pripojené k elektródam nakontaktovaných nanodrôtov, a bolo spustené meranie. Týmto spôsobom bol meraný prúd v rozmedzí stoviek fA. Tento prúd vyplýva z prechodu náboja cez izolačné vrstvy meracieho prístroja a menšie prúdy preto nie je možné zmerať. Všetky merania boli realizované pre privedenie napätia na prúdové kontakty v rozmedzí do $\pm 4\text{ V}$. U väčšiny vzoriek bol, v tomto napäťovom rozmedzí, meraný prúd rádovo do jednotiek pA. To naznačuje vysoký odpor daných InAs nanodrôtov. Taktiež je možné, že spojenie kontaktov a nanodrôtov vytvorilo Schotkyho bariéru s vysokou hodnotou. Väčšina nakontaktovaných InAs nanodrôtov



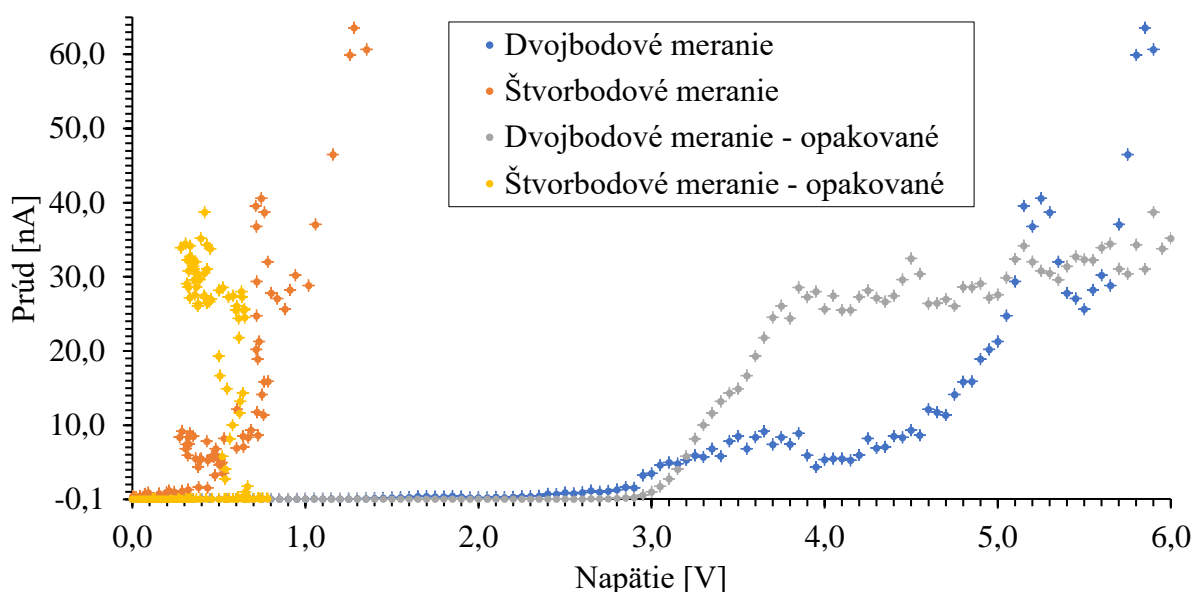
Obrázok č.24: Zobrazenie poškodenia InAs nanodrôtu č.2 po meraní. Obrázok na ľavej strane zobrazuje nakontaktovaný InAs nanodrôt pred meraním a obrázok na pravej strane zobrazuje rovnaký nanodrôt po meraní. Z obrázku je zjavné veľké poškodenie, aj pri minimálnej hodnote prechádzajúceho prúdu (menej než 1 pA).

bola menej než 1 μm dlhých. Taktiež vytvorené kontakty mali malú šírku, čo mohlo spôsobiť vysoký odpor spojenia medzi kontaktom a nanodrôtom (diskutované v sekcii 1.3).

Kvôli malým rozmerom InAs nanodrôtov a z toho vyplývajúcim malým rozmerom kontaktov umiestnených blízko pri sebe, bol taktiež problematický litografický krok lift-off. V mnohých prípadoch došlo k nechcenému vodivému spojeniu kontaktov (obrázok č.10 B). U tohto nanodrôtu (InAs nanodrôt č.1) bola snaha o odstránenie nechcených prepojení pomocou fokusovaného iónového zväzku (boli použité gáliové ióny). Výsledky meraní po odstránení týchto prepojení sú uvedené na obrázku č.23. Graf vykazuje (v porovnaní s meraniami na ostatných InAs nanodrôtoch) obrovský prechádzajúci prúd. Tento jav je pravdepodobne dôsledkom toho, že pri úprave kontaktov gáliovým fokusovaným iónovým zväzkom došlo k implementácii gáliových atómov do dielektrickej vrstvy^[50] nachádzajúcej sa pod prepojeniami kontaktov (v tomto prípade vrstva SiO_2 – bez povrchovej vrstvy HfO_2). Táto implementácia pravdepodobne spôsobila dotovanie dielektrickej vrstvy, a tým bol vytvorený pás dielektrickej vrstvy s vyššou vodivosťou než vodivosť nanodrôtu samotného. Prúd následne pravdepodobne prechádzal cez tento vodivý pás v dielektrickej vrstve, čoho výsledkom je prezentovaný graf.

Poškodenie väčšiny InAs nanodrôtov počas merania bolo značné aj keď nebol meraný prakticky žiadny prechádzajúci prúd (mimo šumu prístroja). Poškodenie je zobrazené na obrázku č.24. Možný prúd prechádzajúci nanodrôtom (menej než 1 pA) mohol byť dostatočný na zahriatie a poškodenie. V neposlednom rade mohol byť problémom jav elektro-termomigrácie^{[51][52][53]}, kedy vplyvom elektrického poľa a zvýšenej teploty dochádza k transportu atómov kontaktov a nanodrôtu. Elektro-termomigrácia môže (ale nemusí) byť jedným z vysvetlení pozorovaného zúženia jednej časti nanodrôtu a rozšírenia inej (viditeľné na obrázku č.24).

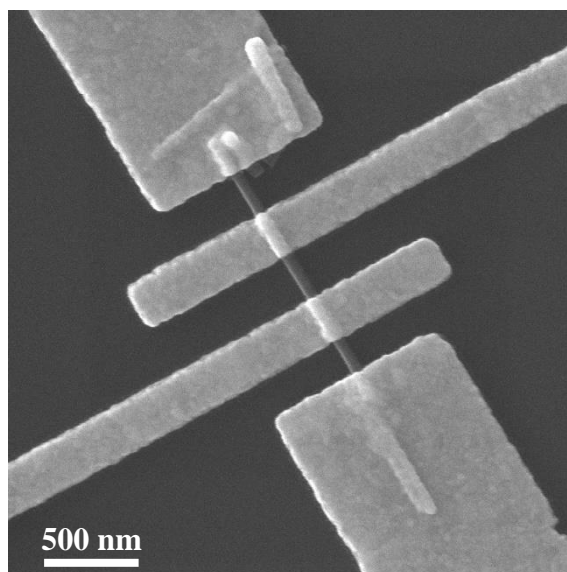
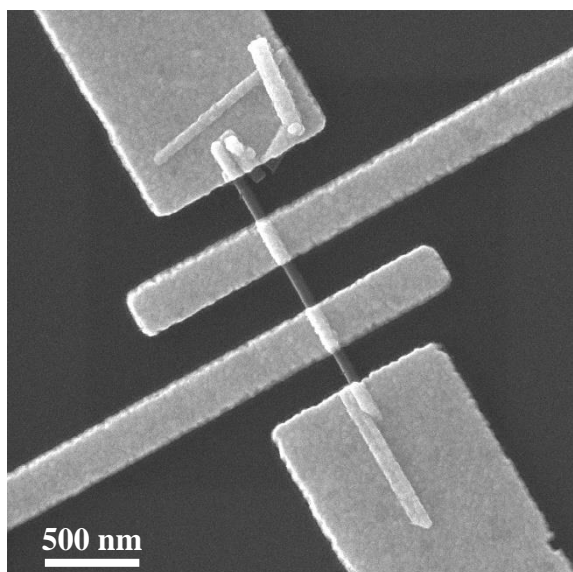
Dvojbodové a štvorbodové meranie - WO_{2,72} nanodrôt



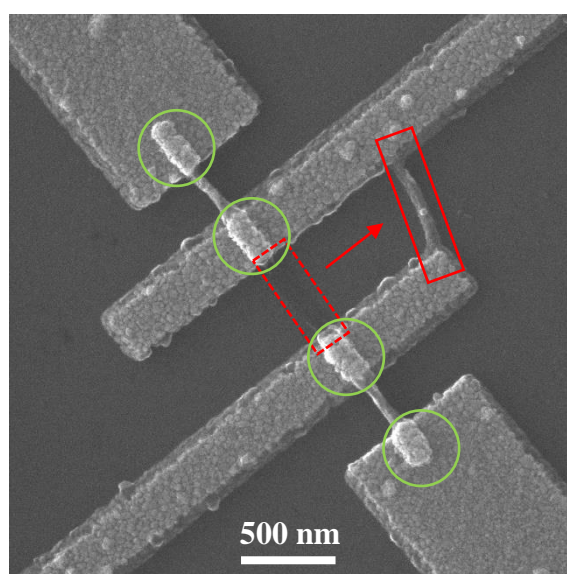
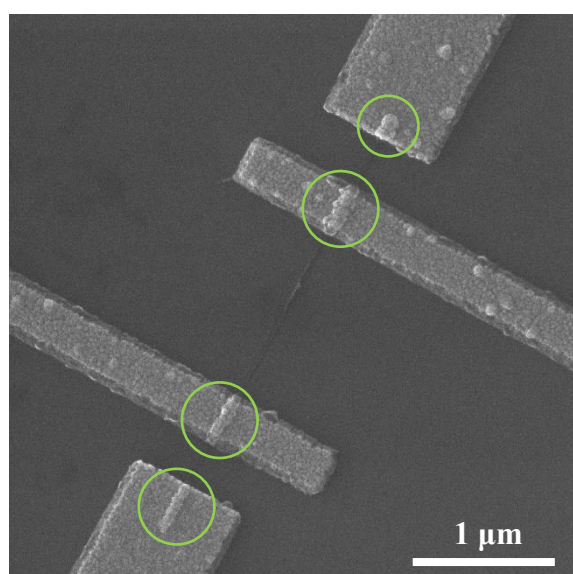
Obrázok č.25: Typické výsledky merania volt-ampérovej charakteristiky WO_{2,72} nanodrôtov zmerané pomocou dvojbodovej a štvorbodovej metódy merania. Napätie bolo merané na prúdových kontaktoch – dvojbodová metóda a na napäťových kontaktoch – štvorbodová metóda. Chybové úsečky boli určené rovnako ako v predchádzajúcich prípadoch. V grafe je viditeľný výrazný nárast prúdu pre hodnotu približne + 6 V pre meranie napätia pri dvojbodovej metóde merania, a nárast prúdu je výrazný pre hodnotu približne + 0,7 V pre meranie pri štvorbodovej metóde.

Poslednými nakontaktovanými nanoštruktúrami, na ktorých boli realizované merania sú nanodrôty WO_{2,72}. Všetky merania mali podobný priebeh: merania vykazovali len šum – rovnako ako v prípade InAs nanodrôtov – a od istej hodnoty napätia merania vykazovali prudký nárast prechádzajúceho prúdu. Tieto merania mali podobný priebeh aj pri opakovaní meraní na jednotlivých nanodrôtoch. Typická nameraná závislosť je zobrazená na obrázku č.25. Zobrazená nameraná závislosť bola nájdená pre WO_{2,72} nanodrôt č.1 zobrazený na obrázku č.26. V prípade meraní napätia pri dvojbodovej metóde merania nastal prudký nárast prúdu približne pre hodnotu napätia + 3 V. U meraní napätia pri štvorbodovej metóde merania je ťažké určiť kedy došlo k prudkému nárastu prúdu, navyše charakter prvého a opakovaného merania sa mierne líši, ale nárast prúdu nastal približne pre hodnotu napätia + 0,7 V. Nárast prúdu až pri určitej hodnote napätia vypovedá o Schottkyho kontakte. Namerané závislosti vykazujú podobný priebeh, ako napríklad práca Wanga a ostatných^[54], čo podporuje teóriu, že sa jedná naozaj o charakteristiku študovaných WO_{2,72} nanodrôtov. Merný odpor materiálu nebol v tomto prípade určovaný, pretože nameraná závislosť vykazuje značne nelineárnu závislosť.

Práca taktiež zahŕňala pokus o nakontaktovanie Ge nanodrôtov. Kovová vrstva kontaktov bola tvorená približne 80 nm Al a povrchovou vrstvou približne 20 nm Au zabráňujúcou oxidácii hliníka. Po litografickom kroku lift-off však boli nakontaktované nanodrôty zničené (obrázok č.27). Dôvody zničenia nanoštruktúr musia byť hlbšie preskúmané. Obrázok č.27 B zobrazuje prípad, kedy pravdepodobne došlo k odlomeniu nanoštruktúry v mieste kontaktov a odplaveniu na iné miesto. Taktiež je však na zvyšnej nanoštruktúre možné vidieť zúženia tejto nanoštruktúry. To by mohlo naznačovať, že nanoštruktúra bola v týchto miestach odleptaná (pravdepodobne vplyvom ponorenia do vody).



Obrázok č.26: Snímka nanodrôtu $\text{WO}_{2,72}$ č.1 z elektrónového rastrovacieho mikroskopu pred (vľavo) a po meraní (vpravo) elektrických transportných vlastností. Snímky naznačujú miernu zmenu v štruktúre kontaktov (pravdepodobne v dôsledku zahriatia), avšak nevykazujú žiadne poškodenie nanodrôtu.



Obrázok č.27: Snímky nakontaktovaných Ge nanodrôtov po litografickom kroku lift-off. Na oboch obrázkoch je z vyvýšených miest na kontaktoch v miestach kde by mal byť nanodrôt (zelený rám) zrejmé, že nanodrôt sa na danom mieste nachádzal pri depozícii kovu na miesta kontaktov. To naznačuje odstránenie Ge nanodrôtu až pri kroku lift-off. Obrázok vpravo naznačuje, že nanodrôt je odlomený v miestach konca kontaktov a odplavený preč (červený rám).

2.2 Fotoluminiscenčné merania

U jednorozmerných nanoštruktúr prezentovaných v sekcii meraní elektrických transportných meraní (sekcia 2.1) bola taktiež snaha o ich charakterizáciu pomocou meraní fotoluminiscencie. Tieto merania nevyžadovali žiadnu predchádzajúcu prípravu nanoštruktúr na meranie. Pri meraní fotoluminiscencie jednotlivých jednorozmerných nanoštruktúr je najväčším problémom slabá intenzita fotoluminiscencie, ktorá nemusí byť daným meracím zariadením detekovateľná. Uvedené merania fotoluminiscencie boli realizované na prístroji Witec Alpha 300R.

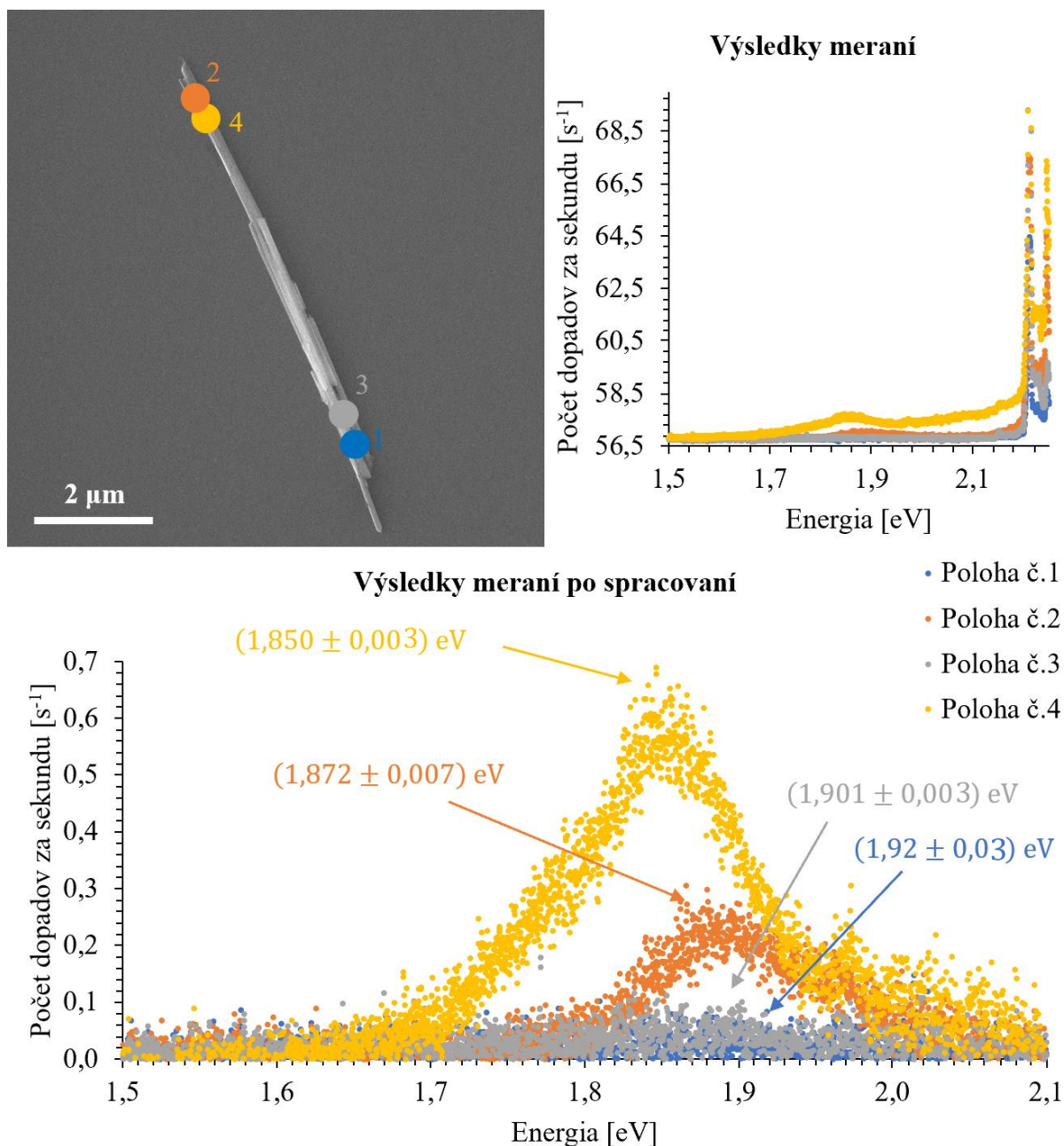
V prvom kroku bola snaha o zmeranie fotoluminiscencie jednotlivých WS₂ nanotrúbíc. Bolo realizovaných viacero meraní pre nájdenie optimálnych nastavení meracej sústavy (výkon excitačného žiarenia, použitá mriežka detektora, ...). V tejto práci budú prezentované dve merania. Prvé meranie bolo realizované na nenakontaktovaných WS₂ nanotrubiiciach a druhé meranie bolo realizované na WS₂ nanotrubiici č.3 po meraní elektrických transportných vlastností (obrázok č.22).

Pri oboch meraniach bol na excitáciu využitý laser s uvádzanou vlnovou dĺžkou 532 nm (zelený laser). Na fokusáciu laserového zväzku bol použitý objektív Zeiss EC Epiplan-Neofluar Dic so stonásobným zväčšením a numerickou apertúrou 0,9. Teoretická uvádzaná veľkosť priemeru stopy zväzku laseru na vzorke je 250 nm.

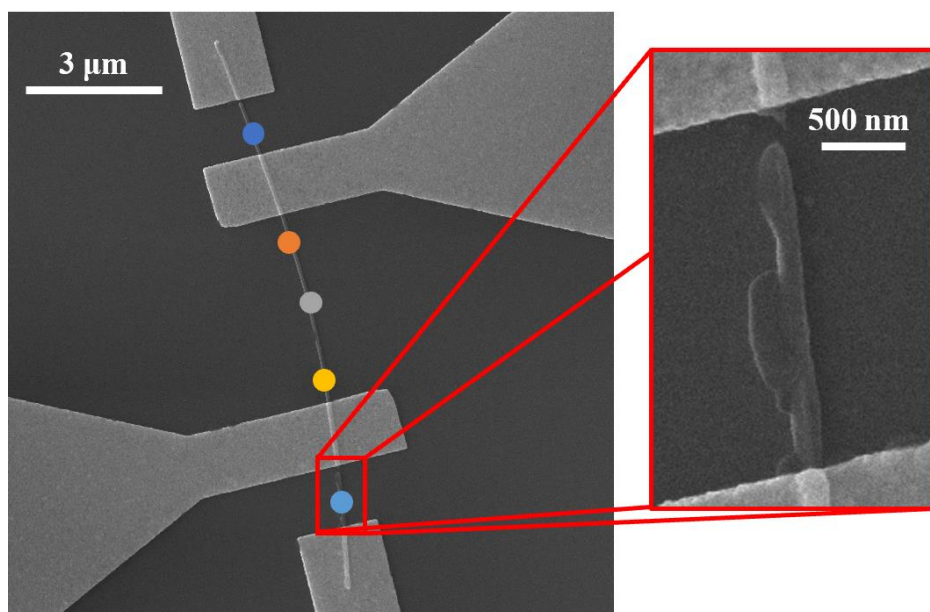
Výsledky prvého merania sú uvedené na obrázku č.28. Merania na jednotlivých pozíciách prebiehali postupne (podľa ich čísla), kde pri meraniach bol výkon laseru postupne nastavený na hodnotu 400 μW, 600 μW, 800 μW a nakoniec na hodnotu 1 mW. Cieľom bolo určiť ideálne nastavenie výkonu laseru a času merania (nižší výkon znamená dlhší čas merania).

Študované nanoštruktúry sú položené na vrstve HfO₂. Ramanove píky HfO₂^[55] ležia v blízkosti fotoluminiscenčných pík WS₂ a čiastočne sa prekrývajú. Výsledky prvého merania sú uvedené na obrázku č.28. Intenzita Ramanových pík je výrazne vyššia než intenzita fotoluminiscenčných pík WS₂ (viac než šesťdesiatnásobne). Pri spracovaní výsledkov meraní bola najprv vybraná časť spektra bez Ramanových pík. Následne bolo odčítané pozadie (konštantná hodnota šumu). Keďže fotoluminiscenčné píky sa s Ramanovými mierne prekrývajú, bolo potrebné určiť základnú čiaru spektra. Bola vybraná oblasť spektra bez fotoluminiscenčných pík, a táto časť spektra bola nafiťovaná exponenciálnou funkciou. Následne bola táto exponenciálna funkcia odčítaná od celého vybraného spektra. Posledným krokom bolo určenie polohy píku. To bolo realizované fitovaním fotoluminiscenčného píku pomocou gausovej funkcie. Takto spracované spektrum je zobrazené v grafe na obrázku č.28.

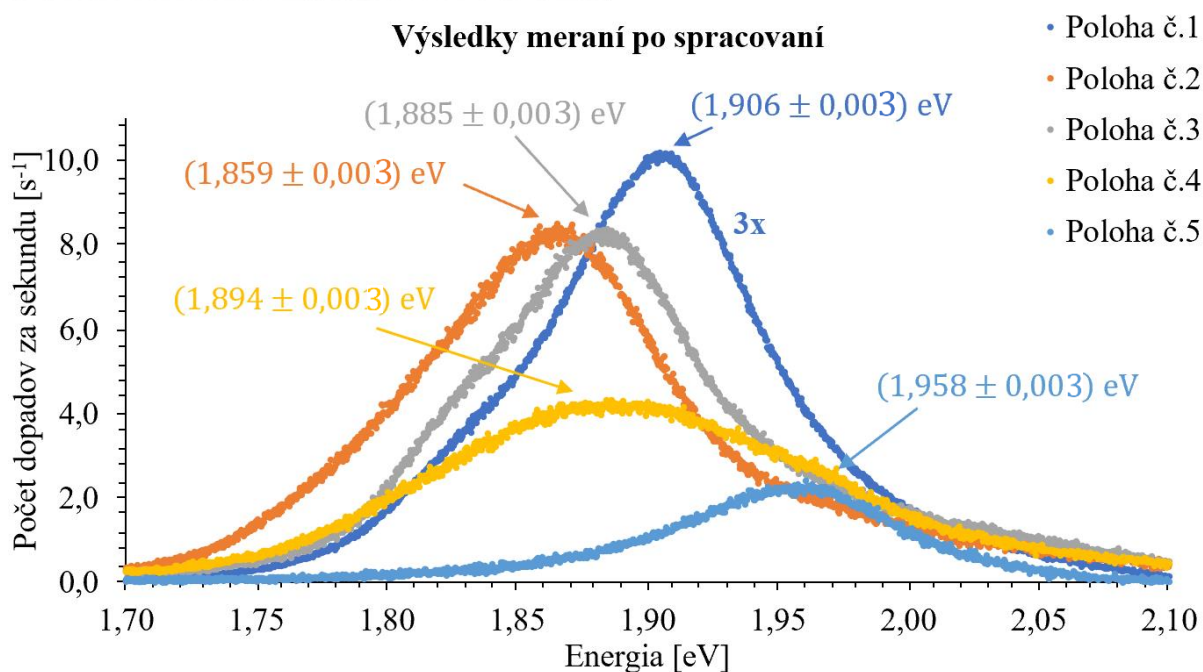
Pre vyšší výkon laseru by sa mal signál zvyšovať, avšak ako môžeme vidieť v grafe, intenzita signálu závisí aj na polohe na nanotrubiici, poprípade je rôzna pre rôzne nanotrúbice. Intenzita signálu pri meraní v polohe č.3 je nižšia než pre prípad merania v polohe č.2 aj pri vyššom výkone laseru. Toto meranie naznačuje, že nanotrúbice nemajú rovnakú štruktúru (z meraní, ktoré nie sú v tejto práci uvedené vyplýva, že štruktúra nemusí byť rovnaká ani v rámci jednej nanotrúbice). Nanotrúbice v spodnej oblasti majú pravdepodobne vyšší počet defektov, vďaka ktorým sú preferované nežiarivé rekombinácie (a teda menší zmeraný signál). Taktiež je vidieť, že poloha píku fotoluminiscencie zo spodnej oblasti a z hornej oblasti meraní sa líši približne o hodnotu 50 meV. Ako už bolo diskutované (sekcia 1.4), poloha fotoluminiscenčného píku vypovedá o páse zakázaných energií daného polovodičového materiálu. Tieto merania preto taktiež naznačujú, že nanotrúbice v protiľahlých oblastiach meraní nemajú úplne rovnaké vlastnosti.



Obrázok č.28: Výsledky prvého merania fotoluminiscencie pre WS₂ nanotrúbice. Vľavo hore je uvedený snímok danej skupiny nanotrúbíc spolu s vyznačenými približnými miestami stopy excitačného laseru. Vpravo hore sú uvedené výsledky meraní. V pravej časti spektra sa nachádzajú Ramanove píky HfO₂, voči ktorým majú píky fotoluminiscencie WS₂ zanedbateľne malý signál. Preto bolo potrebné spracovanie výsledkov meraní (bližšie informácie v texte). Výsledky spracovania sú uvedené na grafe dole. Píky boli fitované Gaussovou funkciou pre zistenie pozície píku. Výsledky sú uvedené v grafe (neistota vyplýva z fitovania). Pre excitáciu bol využitý zelený laser s vlnovou dĺžkou približne 532 nm. Výkon laseru pri jednotlivých meraniach bol postupne 400 μ W, 600 μ W, 800 μ W a pre posledné meranie 1 mW. Pre zaostrenie laserového zväzku na nanotrúbice bol využitý objektív so stonásobným zväčšením. Chybové úsečky v grafoch nie sú uvedené, pretože ich hodnota je tak malá, že by bola v grafoch ťažko pozorovateľná.



Výsledky meraní po spracovaní



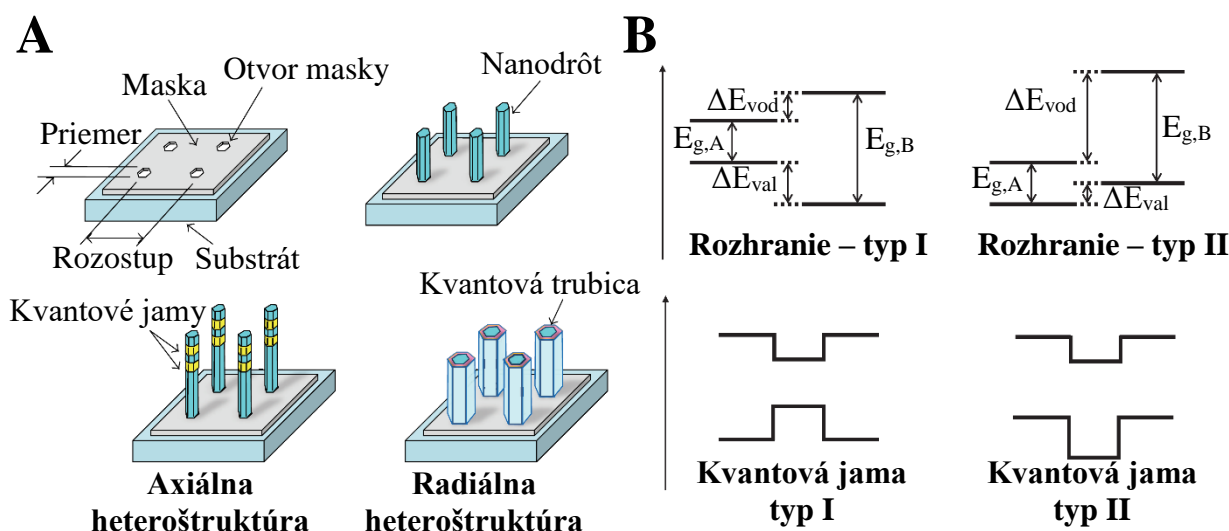
Obrázok č.29: Výsledky merania fotoluminiscencie pre WS₂ nanotrubicu č.4. Vľavo hore je uvedený snímok danej nanotrubicie spolu s vyznačenými približnými miestami stopy excitačného laseru. Zmerané spektrá boli spracované rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade. Pre excitáciu bol využitý rovnaký laser ako v predchádzajúcom prípade a zväzok bol na nanotrubicu zaostrený pomocou rovnakého objektívu. Spektrum získané z polohy č.1 bolo pre účely lepšieho porovnania všetkých meraní trikrát zmenšené. V spektrách je dobre pozorovateľný hlavný pík (s vyznačenou hodnotou), avšak objavujú sa aj bočné píky (zohľadnené pri fitovaní). Tri píky pozorované pri fotoluminiscencii z priestoru nanotrubicie medzi napäťovými kontaktmi sa nachádzajú v blízkom okolí hodnoty 1,879 eV a zvyšné dva píky vykazujú posun smerom k vyšším energiám.

Druhým meraním bolo meranie na WS₂ nanotrubicí č.4 po meraniach elektrických transportných vlastností. Merania prebiehali rovnako ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že u meraní na všetkých pozíciách bol výkon laseru nastavený na hodnotu 600 μW. Spracovanie meraní prebiehalo úplne rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade. Výsledky meraní sú uvedené v grafe na obrázku č.29. Pozícia fotoluminiscenčných pík pri meraniach v polohách medzi napäťovými kontaktmi je veľmi podobná (v rámci presnosti meraní a numerického spracovania dát) a je taktiež v dobrej zhode z meraniami na nanotrubicí č.5 v polohách, ktoré vykazovali intenzívnejší signál. Merania fotoluminiscencie v polohách medzi napäťovými a prúdovými kontaktmi vykazujú posun píku smerom k vyšším energiám. Meranie v polohe č.1 na nanotrubicí č.4 vykazuje podobnú polohu píku ako merania na nanotrubicí č.5 v polohách, ktoré boli charakteristické slabou intenzitou signálu. V prípade merania na nanotrubicí č.4 sa však jedná o najsilnejší zmeraný signál (trojnásobne väčší než ostatné zmerané). Vysoká intenzita by mohla naznačovať vyššiu koncentráciu nosičov náboja. Meranie v polohe č.5 na nanotrubicí č.4 vykazuje pomerne výrazný posun fotoluminiscenčného píku smerom k vyšším energiám. Táto oblasť nanotrubice je zväčšená na obrázku č.29. Je zrejmé, že v tejto oblasti došlo k výraznému poškodeniu nanotrubice. V tomto mieste odpovedá hodnota pásu zakázaných energií (poloha píku) skôr planárnym vrstvám WS₂^[56]. Všeobecne (mimo polohy č.5 na nanotrubicí č.4) fotoluminiscenčnému spektru pravdepodobne dominuje fotoluminiscencia defektných stavov v páse zakázaných energií.

Fotoluminiscenčné merania na ostatných jednorozmerných nanoštruktúrach uvedených v tejto práci nebolo možné realizovať pomocou uvedeného meracieho prístroja. Pre excitáciu fotoluminiscencie WO_{2,72} nanodrôtov by bolo nutné použiť laser s kratšou vlnovou dĺžkou, než má laser použitý pri prezentovaných meraniach (UV laser)^{[57][58][59][60]}. Pre prípad Ge a InAs nanodrôtov je problém s detekciou signálu. U Ge nanodrôtov leží fotoluminiscenčný pík na hranici detekovateľnosti signálu medzi detektorom pre žiarenie z blízkej infračervenej oblasti a detektorom pre žiarenie z viditeľnej oblasti^[61]. Pre prípad fotoluminiscencie InAs nanodrôtov leží fotoluminiscenčný pík za hranicou detekovateľnosti detektorom pre žiarenie z blízkej infračervenej oblasti^[62].

3. Funkčné celky

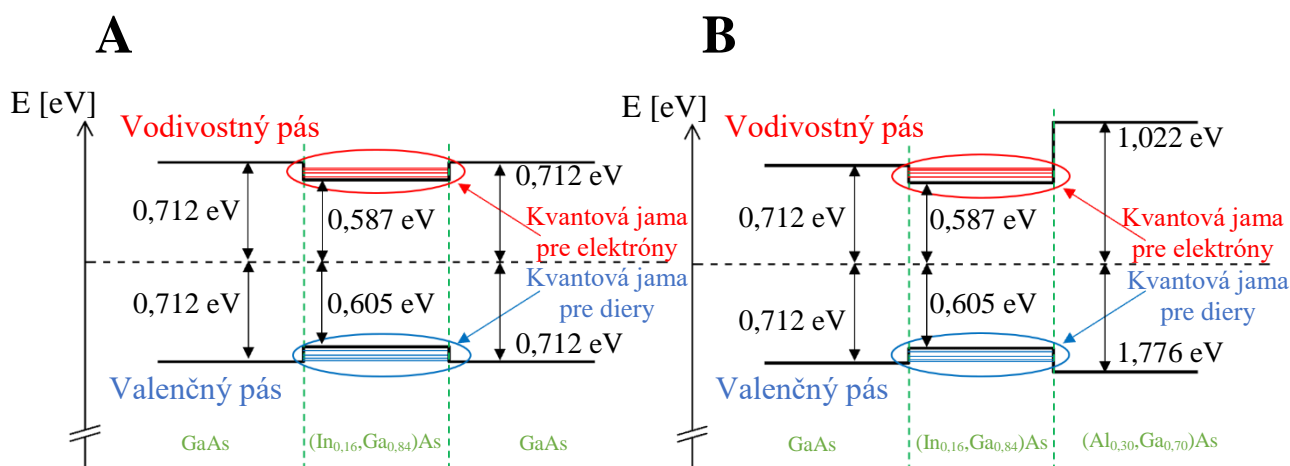
Jednorozmerné nanoštruktúry ponúkajú možnosť aplikácie v mnohých zariadeniach a funkčných celkoch (úvod). Práca uvedená v tejto sekcii bola realizovaná na Inštitúte Elektroniky Pevných Látok Technickej Univerzity vo Viedni pod vedením M.Phys Suzanne Lancaster ako súčasť študijného pobytu ERASMUS+. V tejto práci sú ďalej uvedené fotoluminiscenčné merania jedného prípadu funkčných celkov. Jedná sa o radiálne kvantové jamy. Príklad postupu vytvorenia takejto heteroštruktúry je uvedený na obrázku č.30. Najprv sú vytvorené GaAs nanodrôty (jadro) Ideálnym prípadom je použitie masky, ktorá zabezpečí, že nanodrôty sú vytvorené na požadovaných pozíciách. Pri vytváraní heteroštruktúr prezentovaných v tejto práci však maska nebola použitá. Nanodrôty boli vytvorené z kvapiek Ga rozmiestnených na substráte náhodne (väčšina pozorovaných vzoriek), alebo bola použitá implantácia Ga pomocou gáliového fokusovaného iónového zväzku, kde implantované Ga kvapky boli usporiadané do poľa rovnako ako pri využití masky (jedna vzorka). Na substrát bol následne nanosený rôzny počet vrstiev (In,Ga)As, GaAs, (Al,Ga)As, kde vrstva (In,Ga)As umiestnená medzi vrstvami GaAs/GaAs alebo GaAs/(Al,Ga)As tvorila radiálnu kvantovú jamu. Ternárne zlúčeniny ako (In,Ga)As a (Al,Ga)As sú tvorené tak, že časť Ga atómov v mriežke GaAs je nahradená atómami In alebo Al. Vrstvy použité v tejto práci mali v prípade (In,Ga)As vrstvy v mriežke teoreticky 16% atómov In a 84% atómov Ga a v prípade (Al,Ga)As vrstvy



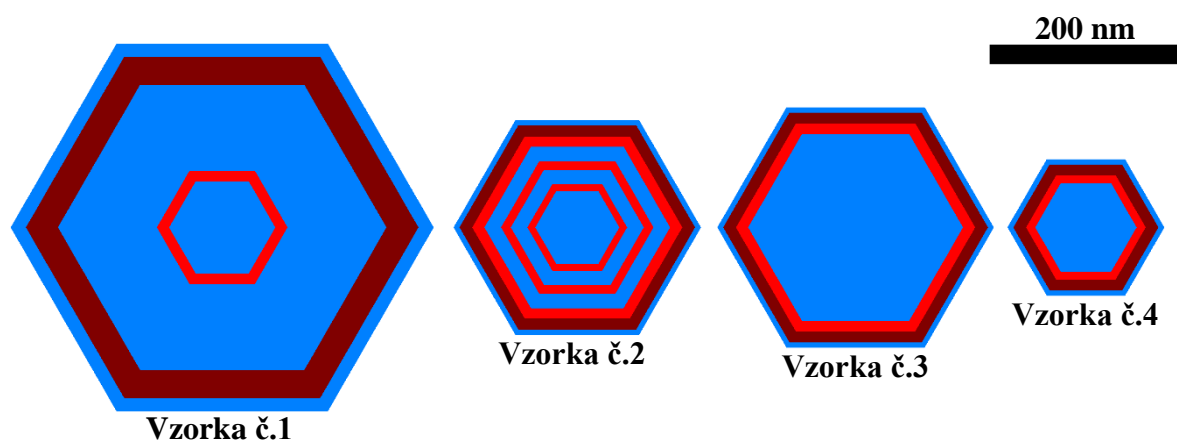
Obrázok č.30: Schematické zobrazenie vytvorenia kvantovej hetroštruktúry v podobe kvantovej jamy. A^[63] zobrazuje postup vytvorenia heteroštruktúry, kedy sú na substráte v prvom kroku vytvorené nanodrôty. Rast nanodrôtov môže byť lepšie kontrolovaný využitím masky, v ktorej sú vytvorené otvory s požadovaným rozmerom a rozostupom. Nanodrôty v takom prípade tvoria rovnomerné pole. Následne sú na takto pripravené nanodrôty nanosené tenké vrstvy, a to buď len na vrchný koniec nanodrôtov (axiálna heteroštruktúra), alebo na všetky steny nanodrôtu (radiálna heteroštruktúra). Kvantové jamy sú následne tvorené vďaka rôznej pásovej štruktúre jednotlivých materiálov. Dva prípady sú zobrazené na obrázku B^[64]. V závislosti na vzájomnom vzťahu polôh valenčného a vodivostného pásu materiálov A a B a veľkosti ich zakázaných pásov ($E_{g,A}$ a $E_{g,B}$) je možné spojením týchto materiálov vytvoriť dva typy spojenia (typ I a typ II), a tým pádom aj dva typy kvantových jám (typ I a typ II). ΔE_{vod} respektíve ΔE_{val} sú rozdiely energií medzi dnami vodivostných pásov materiálu A a materiálu B respektíve rozdiely energií medzi vrchnými okrajmi valenčných pásov materiálu A a materiálu B (takzvané presahy vodivostných respektíve valenčných pásov).

teoreticky 30% atómov Al a 70% atómov Ga. Vrstvy budú preto ďalej popisované ako $(\text{In}_{0,16}, \text{Ga}_{0,84})\text{As}$ respektíve $(\text{Al}_{0,30}, \text{Ga}_{0,70})\text{As}$. Teoretická pásová štruktúra spojenia takýchto vrstiev je zobrazená na obrázku č.31. Obrázok zobrazuje teoretickú pásovú štruktúru daných vrstiev. Skutočná štruktúra sa môže od tej ideálnej (zobrazenej na orázku) líšiť. Dôvody budú diskutované po uvedení výsledkov meraní.

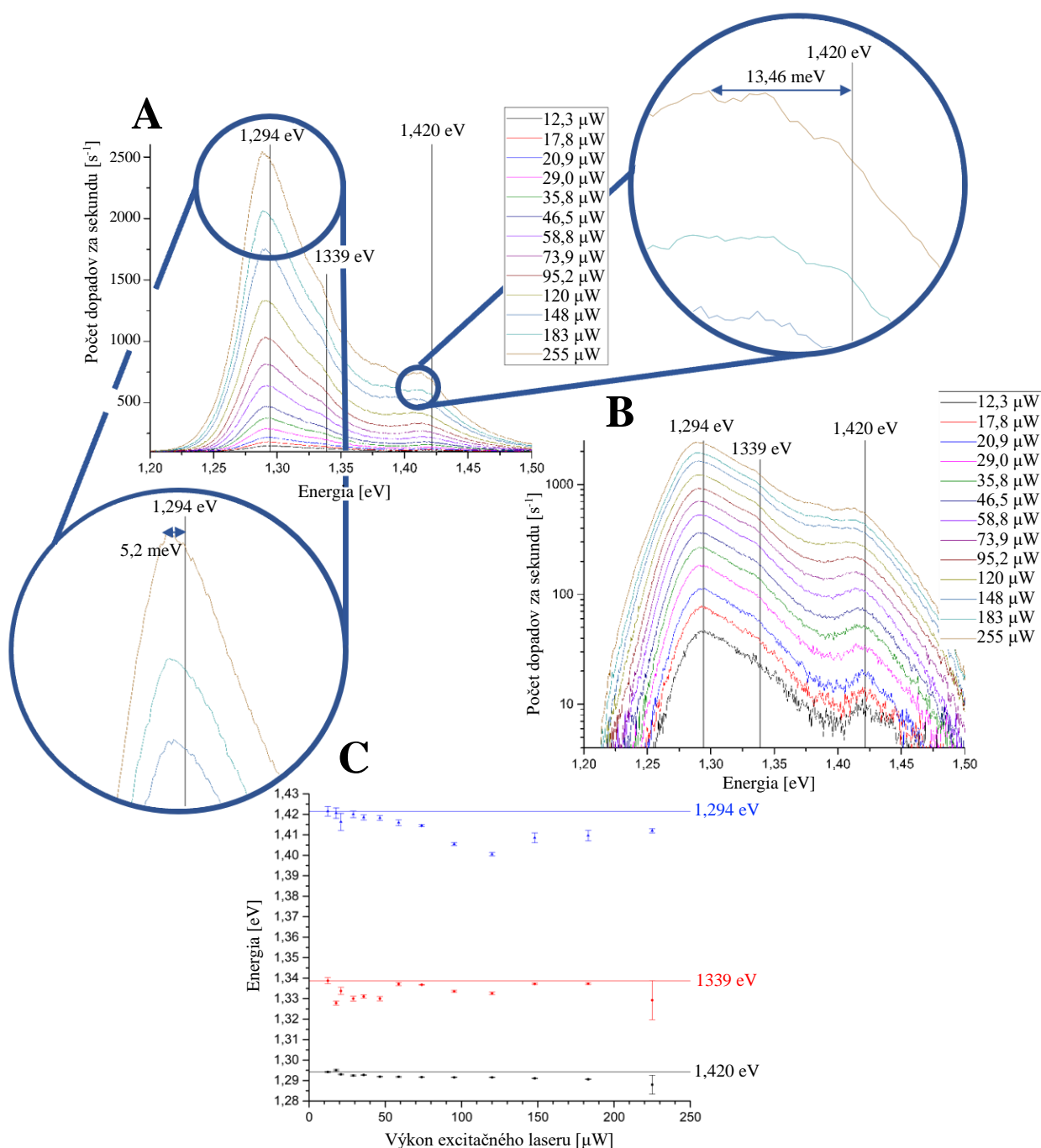
Pri práci boli realizované merania na štyroch rôznych vzorkách. Schematické zobrazenie prierezov jednotlivých vzoriek je zobrazené na obrázku č.32. Odhad hrúbky jednotlivých vrstiev prebiehal nasledujúcim spôsobom. Parametre výroby GaAs jadra a jednotlivých vrstiev boli vo všetkých prípadoch volené ako rovnaké. Vždy bol zvolený rovnaký čas depozície. Niektoré vzorky boli rozrezané pomocou fokusovaného iónového zväzku a pozorované pomocou transmisného elektrónového mikroskopu. Z meraní bol následne odhadnutý vzťah medzi časom depozície a hrúbkou jednotlivých vrstiev. Hodnoty zobrazené na obrázku č.32 sú preto len približné. Všetky merania prebiehali na prístroji Witec Alpha v Inštitúte elektroniky pevných látok vo Viedni. Všeobecne boli realizované štyri druhy meraní: závislosť fotoluminiscencie na výkone exitačného laseru a merania pri nízkych teplotách, obe realizované pre prípad ožiarenia skupiny heteroštruktúr a taktiež jednotlivých heteroštruktúr. Pre excitáciu bol využitý laser s vlnovou dĺžkou 532 nm. Typické výsledky meraní sú zobrazené na obrázku č.33.



Obrázok č.31: Schematické zobrazenie pásovej štruktúry študovaných heteroštruktúr (kvantová jama typu I). Na obrázkoch sú vyznačené teoretické (predpokladané) hodnoty presahov vodivostných a valenčných pásov^{[65][66][67]}. Obrázok **A** zobrazuje kvantovú jamu tvorenú vrstvami GaAs/(In_{0,16},Ga_{0,84})As/GaAs a obrázok **B** zobrazuje kvantovú jamu tvorenú vrstvami GaAs/(In_{0,16},Ga_{0,84})As/(Al_{0,30},Ga_{0,70})As. V obrázkoch sú vyznačené vodivostné a valenčné pásy, a kvantové jamy pre elektróny a pre diery. Schéma zobrazuje jednoduchý pohľad na problematiku. Skutočná pásová štruktúra sa pravdepodobne líši. Dôvody budú diskutované v ďalšom texte.



Obrázok č.32: Schematické zobrazenie priereznov študovaných heteroštruktúr. Modrá farba reprezentuje vrstvu (prípadne jadro) GaAs, tmavočervená farba reprezentuje vrstvu (Al_{0,30},Ga_{0,70})As a svetločervená farba reprezentuje vrstvu (In_{0,16},Ga_{0,84})As (kvantová jama). Teoretická šírka kvantovej jamy vo vzorke č.1 (hrúbka vrstvy (In_{0,16},Ga_{0,84})As) je 11 nm, vo vzorke č.2 je 7 nm pre najvnútornejšiu kvantovú jamu, 8,8 nm pre kvantovú jamu v strede, 11,5 nm pre vonkajšiu kvantovú jamu, vo vzorke č.3 je 11 nm a vo vzorke č.4 je 8,2 nm. Odhad hrúbky jednotlivých vrstiev je popísaný v texte.



Obrázok č.33: Typické fotoluminiscenčné spektrum charakteristické pre študované heteroštruktúry. Prezentované grafy predstavujú meranie závislosti výkonu excitačného laseru pre vzorku č.1. Jedná sa o merania pri ožiarení skupiny heteroštruktúr. V grafoch **A** a **B** sú uvedené výsledky meraní po spracovaní. V grafoch sú vyznačené polohy troch hlavných píkov získané z fitovania dát pre meranie s najnižším výkonom laseru. Graf **C** zobrazuje polohy píkov vyplývajúce z fitovania dát (neistoty plynú taktiež z fitovania) v závislosti na výkone excitačného laseru. Tri hlavné píky sú označené ako pík č.1, pík č.2 a pík č.3 postupne od najnižšej energie. V grafe **A** sú vyznačené posuvy píkov č.1 a č.3 smerom k nižším energiám pri meraní s najvyšším výkonom laseru.

Na obrázku č.33 sú zobrazené výsledky závislosti výkonu excitačného laseru pre prípad ožiarenia skupiny heteroštruktúr na vzorke č.1. Pre zaostrenie laseru na heteroštruktúry bol využitý objektív so štyridsaťnásobným zväčšením. Dáta boli spracovávané rovnako ako v predchádzajúcom prípade s tým rozdielom, že pre určenie základnej čiary bola využitá lineárna funkcia (píky sa v tomto prípade s ničím neprekrývali). Uvedené grafy ukazujú tri typické fotoluminiscenčné píky (pík č.1, pík č.2 a pík č.3 – označenie podľa obrázka). Pík č.3 pravdepodobne pochádza z elektrón – dierovej rekombinácie z vrstvy GaAs, a píky č.1 a č.2 pravdepodobne pochádzajú z elektrón – dierovej rekombinácie vnútri kvantovej jamy (vo vrstve $(\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84})\text{As}$). Pík č.1 následne odpovedá rekombinácii elektrónov s ľahkými dierami a pík č.2 odpovedá rekombinácii elektrónov s ťažkými dierami^[68]. Z teoretickej pásovej štruktúry zobrazenej na obrázku č.31 vyplýva, že v ideálnom prípade by bol pozorovaný jeden pík odpovedajúci rekombinácii vnútri kvantovej jamy (zo základného stavu pre elektróny, do základného stavu pre diery). Z meraní však vyplýva, že nie všetky elektrón – dierové páry rekombinujú vnútri kvantovej jamy (merania boli realizované pri izbovej teplote). Posun píkov pozorovaný v grafoch na obrázku č.33 je možné vysvetliť väčším zahrievaním vzorky pri použití vyšších výkonov excitačného laseru. Merania na jednotlivých heteroštruktúrach naznačujú, že poloha fotoluminiscenčných píkov sa mierne líši (rádovo desiatky meV) pre merania z rôznych pozícií na jednej heteroštruktúre (tieto nie sú v tejto práci uvedené). To môže byť spôsobené tým, že heteroštruktúra nemá konštantný priemer.

Nekonštantný priemer pozorovaný u väčšiny heteroštruktúr môže naznačovať, že aj vrstva tvoriaca kvantovú jamu má v rôznych miestach rôznu šírku, čo má za následok posun fotoluminiscenčného píku. Ďalším faktorom môže byť difúzia atómov medzi jednotlivými vrstvami. V takom prípade by jednotlivé vrstvy neobsahovali predpokladané percentuálne zastúpenie jednotlivých atómov, a ideálna predpokladaná pásová štruktúra zobrazená na obrázku č.31 by bola pozmenená. Odchýlka od ideálnej pásovej štruktúry zobrazenej na obrázku môže byť spôsobená aj ďalšími faktormi. Keďže sa jedná o spojenie materiálov usporiadaných do kryštalografických mriežok s rôznymi mriežkovými parametrami (rôznymi vzdialenosťami atómov), napätie medzi týmito vrstvami môže spôsobiť zmenu pásovej štruktúry na rozhraniach a v celej kvantovej jame (zmenu väzobného potenciálu)^[64]. Na fotoluminiscenčný pík má vplyv taktiež drsnosť vrstiev obklopujúcich kvantovú jamu^[69]. U ostatných vzoriek boli taktiež pozorované spektrá obsahujúce tri hlavné píky. Píky sa nachádzali na podobných hodnotách, kde rozdiely mohli byť spôsobené vyššie uvedenými dôvodmi. Hodnoty u vzoriek č.2 a č.4 sa mierne líšili z dôvodu rôznych širok kvantových jám. U vzorky č.3, v pomere k ostatným meraniam, bol pozorovaný slabý signál fotoluminiscencie. Pravdepodobným dôvodom bola kontaminácia vzorky atómami uhlíku pri implantácii pomocou gálievého fokusovaného iónového zväzku. Mimo slabý signál z fotoluminiscencie sa heteroštruktúry vzorky č.3 javia v dobrej kvalite.

Pri meraniach teplotnej závislosti došlo k problémom meracej sústavy, a preto teplotná závislosť nie je v tejto práci prezentovaná. Pri teplotách vyšších než 50 K dochádzalo k neželanému posuvu meranej vzorky, a nebolo možné získať kompletne spektrum, pretože počas merania sa heteroštruktúra spolu s celým substrátom posunula mimo stopu excitačného laseru. Spektrum získané pri nižších teplotách však vykazovalo jediný pík pravdepodobne pochádzajúci z rekombinácií vnútri kvantovej jamy. Pík pochádzajúci z rekombinácií vo vrstve GaAs nebol v spektrách meraných pri teplotách nižších než 50 K pozorovaný.

Záver

Predložená diplomová práca sa zaoberá jednorozmernými polovodičovými nanoštruktúrami, predovšetkým prístupom a praktickými realizáciami kontaktovania uvedených nanoštruktúr, meraním ich elektrických transportných vlastností a fotoluminiscenčných spektier. V práci sú diskutované rôzne techniky meraní elektrických transportných vlastností, výhody jednotlivých metód a náročnosť praktickej aplikácie meraní v prípade jednorozmerných polovodičových nanoštruktúr. Diskusia zahŕňa metódu dvojbodového a štvorbodového merania s pridanou hradlovou elektródou, metódu využívajúcu Hallov jav a pulznú metódu meraní. V práci sú taktiež uvedené spôsoby získania požadovaných hodnôt veličín, ako napríklad merný odpor, koncentrácia nosičov náboja, pohyblivosť nosičov náboja a driftová rýchlosť z nameraných hodnôt. Veľká časť práce sa venuje procesu kontaktovania nanoštruktúr a optimalizácii procesu pre dosiahnutie čo najlepších výsledkov. Taktiež je uvedený druhý prístup charakterizácie vlastností nanoštruktúr pomocou optických meraní – jedná sa o fotoluminiscenčné merania. Jadrom práce sú merania elektrických transportných vlastností WS_2 nanotrubíc, InAs nanodrôtov, $\text{WO}_{2,72}$ nanodrôtov a Ge nanodrôtov. Práca ďalej prezentuje optické merania na uvedených nanoštruktúrach. Poslednú časť práce tvorí štúdium a pochopenie procesov v radiálnych kvantových jamách tvorených jednorozmernými heteroštruktúrami prostredníctvom fotoluminiscenčných meraní

Pre kontaktovanie jednorozmerných nanoštruktúr, za účelom meraní elektrických transportných vlastností, bol zvolený prístup elektrónovej litografie. Jedná sa o relatívne pomalú (v porovnaní k bežne využívanej optickej litografii) viackrokovú metódu, ktorá však poskytuje dostatočnú presnosť pre prácu s tak malými objektami, ako sú jednorozmerné nanoštruktúry. Pre merania bola spomedzi prezentovaných metód zvolená metóda dvojbodového a štvorbodového merania s pridanou hradlovou elektródou pre možnosť určenia koncentrácie nosičov náboja (túto možnosť uvedené metódy v konfigurácii bez hradlovej elektródy neposkytujú). Merania s použitím hradlovej elektródy však v práci nie sú uvedené. Ako hradlová elektróda slúžil substrát tvorený dotovaným Si. Na substráte boli vytvorené vrstvy SiO_2 a HfO_2 slúžiace ako dielektrická vrstva oddeľujúca hradlovú elektródu a kontakty, následne vytvorené na povrchu. V prvom kroku boli na povrchu substrátu litograficky vytvorené zámerné značky uľahčujúce a spresňujúce litografické kroky pri vytváraní následných kontaktov. Veľká časť práce bola venovaná práve optimalizácii procesu litografie pre dosiahnutie požadovanej presnosti. Optimalizácia sa týkala nájdenia vhodných rozmerov kontaktov, vhodných parametrov litografie, voľbe vhodnej kovovej vrstvy s vhodnou hrúbkou. Po takmer dvojročnom úsilí sa podarilo dosiahnuť stav, kedy je výťažnosť nakontaktovaných nanoštruktúr uspokojivo vysoká. Prvý z cieľov diplomovej práce bol týmto splnený. Pre lepšie výsledky bola vynaložená snaha o čo najlepšie spojenie kontaktu a nanoštruktúry. Krokom litografie, ktorý spôsoboval najviac zlyhaní, sa ukázal byť krok lift-off. Nakoniec bolo úspešne nakontaktovaných dvanásť WS_2 nanotrubíc, štyri InAs nanodrôty a štyri $\text{WO}_{2,72}$ nanodrôty. Ge nanodrôty sa nakoniec nepodarilo nakontaktovať kvôli opakovaným chybám pri krokoch litografie a nedostatku času pre opakované pokusy. Práca pokračovala meraniami elektrických transportných vlastností na nakontaktovaných nanoštruktúrach.

Pri meraniach na WS_2 nanotrubiciach bol optimalizovaný proces meraní. Taktiež bol pokus o verifikáciu výsledkov (opakovateľnosť, overenie prechodu prúdu nanoštruktúrou). Pre dané dve WS_2 nanotrubice bola taktiež snaha o určenie merného odporu. Pre určenie tejto veličiny boli jednotlivé nanotrubice aproximované modelom valca s konštantným priemerom a vyplnené materiálom v celej ploche prierezu. Elektrické pole pri meraní bolo pri tomto výpočte považované za uniformné naprieč celou nanoštruktúrou. Tieto predpoklady sú veľmi aproximatívne, a preto uvedené hodnoty merného odporu môžu byť považované len za odhad.

Nájdené hodnoty sú $\rho_1 = (2,7 \pm 0,7) \Omega\text{m}$ a $\rho_2 = (0,16 \pm 0,03) \Omega\text{m}$. Odpory jednotlivých WS₂ nanotrubic majú hodnoty $R_1 = (472 \pm 6) \text{M}\Omega$ a $R_2 = (14,50 \pm 0,10) \text{M}\Omega$. Práca Leviho a ostatných^[19] vykazuje približne o tri rády nižší merný odpor. Merania uvedené v ich práci boli však realizované vo vákuu, zatiaľ čo merania uvedené v tejto práci boli realizované na vzduchu. Porovnanie práve s touto prácou je relevantné z toho dôvodu, že WS₂ nanotrubičky prezentované v tejto práci boli vytvorené práve rovnakou výskumnou skupinou. Pozorovanie WS₂ nanotrubic po meraniach elektrických transportných vlastností pomocou elektrónového rastrovacieho mikroskopu naznačujú poškodenie týchto nanotrubic. Je to pravdepodobne spôsobené ich zahriatím.

Merania elektrických transportných vlastností InAs nanodrôtov vykazovali v rozmedzí privedeného napätia -4 V až $+4 \text{ V}$ prúd na úrovni šumu meracieho prístroja. To mohlo byť pravdepodobne spôsobené vznikom Schottkyho kontaktu s vysokou hodnotou Schottkyho potenciálovej bariéry pre nosiče náboja. Ďalším problémom mohol byť vysoký odpor kontaktov z dôvodu ich malého presahu s nanoštruktúrou. Pozorovaním InAs nanodrôtov po meraniach elektrických transportných vlastností bolo taktiež zistené značné poškodenie nanodrôtov.

Merania elektrických transportných vlastností WO_{2,72} nanodrôtov vykazovali Schottkyho kontakt. Prezentovaný príklad merania na jednom z nanodrôtov pomocou dvojbodovej metódy vykazoval približne po hodnotu napätia $+3 \text{ V}$ len šum, a nad touto hodnotou napätia zmeraná volt-ampérová charakteristika vykazovala prudký nárast prúdu. Merania majú porovnateľné výsledky s prácou Wanga a ostatných^[54]. Pri pozorovaní WO_{2,72} nanodrôtov po realizácii elektrických transportných meraní, tieto nevykazovali žiadne pozorovateľné poškodenie.

Merania elektrických transportných vlastností Ge nanodrôtov sa nepodarilo realizovať kvôli problémom pri vytváraní kontaktov.

Ďalšími uvedenými meraniami boli merania fotoluminiscencie. Boli realizované dve série meraní. Prvé meranie prebiehalo na skupine nenakontaktovaných WS₂ nanotrubic a druhé meranie prebiehalo na jednej z nakontaktovaných nanotrubic po meraniach elektrických transportných meraní. Spracovanie zmeraných spektier spočívalo v odčítaní konštantného pozadia, v oddelení fotoluminiscenčných pík WS₂ od Ramanových pík HfO₂. Nakoniec boli píky fitované gaussovou funkciou (respektíve viacerými gaussovými funkciami) pre určenie polohy píku. Poloha píku vo výslednom spektre následne odpovedá pásu zakázaných energií WS₂. Zmerané hodnoty sa medzi sebou mierne líšia. Vypovedá to o rôznej štruktúre WS₂ nanotrubičiek v rôznych miestach. Niektoré zmerané WS₂ nanotrubičky nevykazujú žiadnu fotoluminiscenciu. V týchto nanotrubičiek (popríklad na týchto miestach) prevládajú neziarivé prechody.

Fotoluminiscenčné merania ostatných študovaných nanoštruktúr nebolo možné na použitom prístroji realizovať buď kvôli absencii laseru s dostatočne vysokou energiou fotónov na vybudenie fotoluminiscencie (prípád WO_{2,72} nanodrôtov), alebo kvôli nemožnosti zdetekovať fotoluminiscenčný signál (prípád InAs a Ge nanodrôtov).

Poslednými realizovanými meraniami uvedenými v tejto práci boli merania fotoluminiscencie na heteroštruktúrach – radiálnych kvantových jamách. Heteroštruktúry boli tvorené GaAs nanodrôtmí a rôznou sériou vrstiev GaAs, (In,Ga)As a (Al,Ga)As. Vrstva (In,Ga)As slúžila ako efektívna kvantová jama. Pomocou meraní fotoluminiscencie bola snaha o určenie vlastností týchto nanoštruktúr. Merania prebiehali ako aj merania na jednotlivých heteroštruktúrach, tak aj na skupine nanoštruktúr súčasne. Taktiež bol skúmaný vplyv nastavenia výkonu excitačného laseru na meranie. Merania pri nízkych teplotách nebolo možné realizovať pre nedostatky meracej sústavy. Boli skúmané štyri rôzne typy heteroštruktúr za účelom ich vzájomného porovnania. Merania ukazujú mierne rozdiely aj medzi heteroštruktúrami jedného typu – rozdiely v štruktúre jednotlivých heteroštruktúr.

Literatúra

- [1] SAKAKI, H. Scattering suppression and high-mobility effect of size-quantized electrons in ultrafine semiconductor wire structures. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, 19.12: L735.
- [2] XIANG, J., et al. Ge/Si nanowire heterostructures as high-performance field-effect transistors. *nature*, 2006, 441.7092: 489.
- [3] CUI, Y., et al. High performance silicon nanowire field effect transistors. *Nano letters*, 2003, 3.2: 149-152.
- [4] FAN, Z., et al. ZnO nanowire field-effect transistor and oxygen sensing property. *Applied Physics Letters*, 2004, 85.24: 5923-5925.
- [5] TSAKALAKOS, L., et al. Silicon nanowire solar cells. *Applied physics letters*, 2007, 91.23: 233117.
- [6] LAW, M., et al. Nanowire dye-sensitized solar cells. *Nature materials*, 2005, 4.6: 455.
- [7] AHN, Y. H.; PARK, Jiwoong. Efficient visible light detection using individual germanium nanowire field effect transistors. *Applied Physics Letters*, 2007, 91.16: 162102.
- [8] BRATKOVSKI, A.; KAMINS, T. I. *Nanowire-based light-emitting diodes and light-detection devices with nanocrystalline outer surface*. U.S. Patent No 7,863,625, 2011.
- [9] ZHAI, T., et al. A comprehensive review of one-dimensional metal-oxide nanostructure photodetectors. *Sensors*, 2009, 9.8: 6504-6529.
- [10] CURRELI, Marco, et al. Selective functionalization of In₂O₃ nanowire mat devices for biosensing applications. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127.19: 6922-6923.
- [11] ARTER, J. A., et al. Virus-PEDOT nanowires for biosensing. *Nano letters*, 2010, 10.12: 4858-4862.
- [12] TIAN, B., et al. Coaxial silicon nanowires as solar cells and nanoelectronic power sources. *nature*, 2007, 449.7164: 885.
- [13] BRUBAKER, M., et al. UV LEDs based on pin core-shell AlGaIn/GaN nanowire heterostructures grown by N-polar selective area epitaxy. *Nanotechnology*, 2019.
- [14] DIMAKIS, E., et al. Coaxial multishell (In, Ga) As/GaAs nanowires for near-infrared emission on Si substrates. *Nano letters*, 2014, 14.5: 2604-2609
- [15] KITTEL, Ch.; MCEUEN, Paul; MCEUEN, Paul. *Introduction to solid state physics*. New York: Wiley, 1976.
- [16] XIANG, B., et al. Rational synthesis of p-type zinc oxide nanowire arrays using simple chemical vapor deposition. *Nano Letters*, 2007, 7.2: 323-328.
- [17] ZHONG, Z., et al. Synthesis of p-type gallium nitride nanowires for electronic and photonic nanodevices. *Nano Letters*, 2003, 3.3: 343-346.
- [18] XU, K., et al. Component-Controllable WS₂ (1-x) Se₂ x Nanotubes for Efficient Hydrogen Evolution Reaction. *Acs Nano*, 2014, 8.8: 8468-8476.
- [19] LEVI, R., et al. Field-effect transistors based on WS₂ nanotubes with high current-carrying capacity. *Nano letters*, 2013, 13.8: 3736-3741.
- [20] PILLARISSETTY, R. Academic and industry research progress in germanium nanodevices. *Nature*, 2011, 479.7373: 324.

- [21] MACQUORN W. ; RANKINE J. XVIII. On the general law of the transformation of energy. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1853, 5.30: 106-117.
- [22] PURCELL, E. M.; MORIN, D. J. *Electricity and magnetism*. Cambridge University Press, 2013.
- [23] OHM, G. S. *The Galvanic circuit investigated mathematically*. D. Van Nostrand Company, 1905.
- [24] ZHAO, X.; VANDERBILT, D.. First-principles study of structural, vibrational, and lattice dielectric properties of hafnium oxide. *Physical Review B*, 2002, 65.23: 233106.
- [25] PAUL, C. R. *Analysis of multiconductor transmission lines*. John Wiley & Sons, 2008.
- [26] DRUDE, P. Zur elektronentheorie der metalle. *Annalen der Physik*, 1900, 306.3: 566-613.
- [27] STORM, K., et al. Spatially resolved Hall effect measurement in a single semiconductor nanowire. *Nature nanotechnology*, 2012, 7.11: 718.
- [28] BLÖMERS, Ch., et al. Hall effect measurements on InAs nanowires. *Applied physics letters*, 2012, 101.15: 152106.
- [29] SINGH, Y. Electrical resistivity measurements: a review. In: *International journal of modern physics: Conference series*. World Scientific Publishing Company, 2013. p. 745-756.
- [30] MERIC, I., et al. Channel length scaling in graphene field-effect transistors studied with pulsed current– voltage measurements. *Nano letters*, 2011, 11.3: 1093-1097.
- [31] BAYLIS, C. P.; DUNLEAVY, L. P. Understanding pulsed IV measurement waveforms. In: *The 11th IEEE International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications*, 2003. EDMO 2003. IEEE, 2003. p. 223-228.
- [32] HAYNES, J. R.; SHOCKLEY, W. The mobility and life of injected holes and electrons in germanium. *Physical Review*, 1951, 81.5: 835.
- [33] HERRING, C. Theory of transient phenomena in the transport of holes in an excess semiconductor. *Bell System Technical Journal*, 1949, 28.3: 401-427.
- [34] CITTERBERG, D. *Kontaktování jednorozměrných nanostruktur*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 26 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.
- [35] LÉONARD, F.; TALIN, A. Alec. Electrical contacts to one-and two-dimensional nanomaterials. *Nature nanotechnology*, 2011, 6.12: 773.
- [36] SIVARAMAKRISHNAN, R., et al. Rate constants for the thermal decomposition of ethanol and its bimolecular reactions with OH and D: reflected shock tube and theoretical studies. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2010, 114.35: 9425-9439.
- [37] VLADAR, A.; POSTEK, M. Electron beam-induced sample contamination in the SEM. *Microscopy and microanalysis*, 2005, 11.S02: 764-765.
- [38] PALACIOS, J. J., et al. First-principles phase-coherent transport in metallic nanotubes with realistic contacts. *Physical review letters*, 2003, 90.10: 106801.
- [39] WOODRUFF, S. M., et al. Nickel and nickel silicide Schottky barrier contacts to n-type silicon nanowires. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and*

- Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2008, 26.4: 1592-1596.
- [40] ZHANG, Y., et al. Heterostructures of single-walled carbon nanotubes and carbide nanorods. *Science*, 1999, 285.5434: 1719-1722.
 - [41] LÉONARD, F.; TALIN, A. Alec. Size-dependent effects on electrical contacts to nanotubes and nanowires. *Physical review letters*, 2006, 97.2: 026804.
 - [42] GOETZBERGER, A.; SCARLETT, R. M. *Research and investigation of inverse epitaxial UHF power transistors*. CLEVITE TRANSISTOR PALO ALTO CA SHOCKLEY TRANSISTOR DIV, 1964.
 - [43] SANGUINETTI, S., et al. Photoluminescence Characterization of Structural and Electronic Properties of Semiconductor Quantum Wells. 2013.
 - [44] BEBB, H. B.; WILLIAMS, E. W. Photoluminescence I: theory. In: *Semiconductors and semimetals*. Elsevier, 1972. p. 181-320.
 - [45] DEAN, P. J. Photoluminescence as a diagnostic of semiconductors. *Progress in Crystal Growth and Characterization*, 1982, 5.1-2: 89-174.
 - [46] LINDGREN, D. et al. Study of carrier concentration in single InP nanowires by luminescence and Hall measurements. *Nanotechnology*, 2015, 26.4: 045705.
 - [47] LINDEFELT, U.. Doping-induced band edge displacements and band gap narrowing in 3C-, 4H-, 6H-SiC, and Si. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84.5: 2628-2637.
 - [48] BUGAJSKI, M.; LEWANDOWSKI, W. Concentration-dependent absorption and photoluminescence of n-type InP. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57.2: 521-530.
 - [49] SIEG, R. M.; RINGEL, S. A. Reabsorption, band-gap narrowing, and the reconciliation of photoluminescence spectra with electrical measurements for epitaxial n-InP. *Journal of applied physics*, 1996, 80.1: 448-458.
 - [50] COOPER, D., et al. Dopant profiling of focused ion beam milled semiconductors using off-axis electron holography; reducing artifacts, extending detection limits and reducing the effects of gallium implantation. *Ultramicroscopy*, 2010, 110.5: 383-389.
 - [51] DECHIARO, L. F. Electro-thermomigration in NMOS LSI devices. In: *19th International Reliability Physics Symposium*. IEEE, 1981. p. 223-229.
 - [52] WU, Wuchen, et al. Investigation on the long term reliability of power IGBT modules. In: *Proceedings of International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's: ISPSD'95*. IEEE, 1995. p. 443-448.
 - [53] YE, H.; LIN, M.; BASARAN, C.. Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2002, 38.7: 601-612.
 - [54] WANG, S. J., et al. Electronic transport property of single-crystalline hexagonal tungsten trioxide nanowires. *Applied Physics Letters*, 2009, 94.26: 263106.
 - [55] BOROWICZ, P., et al. Raman spectra of high- κ dielectric layers investigated with micro-Raman spectroscopy comparison with silicon dioxide. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013.
 - [56] GUTIÉRREZ, H. R., et al. Extraordinary room-temperature photoluminescence in triangular WS₂ monolayers. *Nano letters*, 2012, 13.8: 3447-3454.

- [57] LEE, K.; SEO, W. S.; PARK, J. T. Synthesis and optical properties of colloidal tungsten oxide nanorods. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125.12: 3408-3409.
- [58] XI, G., et al. Ultrathin W18O49 nanowires with diameters below 1 nm: synthesis, near-infrared absorption, photoluminescence, and photochemical reduction of carbon dioxide. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51.10: 2395-2399.
- [59] CHANG, M. T., et al. Nitrogen-doped tungsten oxide nanowires: low-temperature synthesis on Si, and electrical, optical, and field-emission properties. *small*, 2007, 3.4: 658-664.
- [60] WOO, K., et al. Coordinatively induced length control and photoluminescence of W18O49 nanorods. *Inorganic chemistry*, 2005, 44.20: 7171-7174.
- [61] KAWAMURA, Y., et al. Direct-gap photoluminescence from germanium nanowires. *Physical Review B*, 2012, 86.3: 035306.
- [62] MÖLLER, M., et al. Optical emission of InAs nanowires. *Nanotechnology*, 2012, 23.37: 375704.
- [63] HIRUMA, K., et al. Fabrication of axial and radial heterostructures for semiconductor nanowires by using selective-area metal-organic vapor-phase epitaxy. *Journal of Nanotechnology*, 2012, 2012.
- [64] MENGISTU, H. T.; GARCÍA-CRISTÓBAL, Alberto. Generalized Plane Piezoelectric Problem: Application to Heterostructure Nanowires. In: *Proceedings of COMSOL Multiphysics conference, Cambridge, England*. 2014.
- [65] GOETZ, K. H., et al. Optical and crystallographic properties and impurity incorporation of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ (0.44 less than x less than 0.49) grown by liquid phase epitaxy, vapor phase epitaxy and metal organic chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54.8: 4543-4552.
- [66] LEVINSHTEIN, MSYPM (ed.). *Handbook series on semiconductor parameters*. World Scientific, 1997.
- [67] ARENT, D. J., et al. Strain effects and band offsets in GaAs/InGaAs strained layered quantum structures. *Journal of applied physics*, 1989, 66.4: 1739-1747.
- [68] DIMAKIS, E., et al. Coaxial multishell (In, Ga) As/GaAs nanowires for near-infrared emission on Si substrates. *Nano letters*, 2014, 14.5: 2604-2609.
- [69] BERTOLET, D. C., et al. Exciton photoluminescence linewidths in very narrow AlGaAs/GaAs and GaAs/InGaAs quantum wells. *Journal of applied physics*, 1988, 64.11: 6562-6564.